

Universitat de Lleida

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària

Treball Final de Grau en Enginyeria Forestal

**Estudi de l'evolució del mantell nival en diferents zones del Pirineu
Central a través d'imatges satel·litàries Sentinel-2**

Autor

Víctor Montilla Prieto

Tutor

Víctor Falguera Pascual

Cotutor

Francisco García Ruiz

Lleida, octubre de 2019

..... Du Mont Blanc même, il faut venir au Mont Perdu. Quand on a vu la première montagne granitique, il reste à voir la première des montagnes calcaires

..... Del mateix Mont Blanc cal anar al Mont Perdut. Quan s'ha vist la primera muntanya granítica, resta per veure la primera de les muntanyes calcàries

L. Ramond de Charbonnières

Índex

1. Introducció	1
2. Objectiu del treball	2
3. Regió de l'estudi	3
4. Metodologia	6
4.1 Procés metodològic	6
4.2 Obtenció de la informació	7
4.3 Processat de la informació	12
4.3.1 Visualització prèvia i selecció de les imatges	13
4.3.2 Càlcul de l'Índex de Diferència Normalitzada de la Neu (NDSI)	14
4.4 Sortides de Camp a les zones d'estudi	16
4.5 Informació complementaria a l'NDSI	18
4.5.1 Dades meteorològiques analitzades	18
4.5.2 Informació generada a partir del Model Digital del Terreny	20
5. Resultats i discussió	23
5.1 Evolució del mantell nival a través del valor NDSI	23
5.2 Situació meteorològica vers l'evolució de l'NDSI	31
5.3 Distribució del mantell nival	34
5.3.1 Comprovació de la cartografia a través de les sortides realitzades	48
5.4 Pendents a partir del Model Digital del Terreny	55
6. Conclusions	58
7. Referències Bibliogràfiques	59

1. Introducció

La neu no és un fenomen meteorològic com a tal, sinó que és el resultat de la precipitació de petits cristalls de gel. Uns cristalls amb formes fractals que s'uneixen i formen els flocs, amb una estructura oberta i mòbil excepte quan es comprimeix a causa d'una pressió externa.

Aquesta neu té una influència directa sobre processos geomorfològics, la fauna i la flora de les zones on es produeixen nevades de forma recurrent s'adapten i canvien la seva fenologia per poder-hi viure, i, endemés, un gran nombre d'activitats econòmiques es veuen influenciades per la presència o no de la neu a les zones de muntanya. En latituds i condicions climàtiques com les presents a la península Ibèrica, la neu té un paper clau en els processos hidrològics en serralades com el Pirineu, fet que representa l'aportació hídrica més gran als rius en els mesos de primavera. Alhora, diversos estudis i treballs demostren com les glaceres del Pirineu disminueixen la superfície, com ara la Glacera de la Maladeta, que entre els anys 1820 i 1830 presentava una extensió de 152,30 hectàrees, passant a una superfície de 54,5 hectàrees l'any 2000, amb una reducció pròxima al 36% (Chueca et al., 2005). Els canvis climatològics que s'observen en l'actualitat tenen en el mantell nival un indicador més.

A més, el sector del turisme de neu ha canviat el Pirineu. Un exemple en són les valls del riu Gállego i Aragón, on la població dels municipis d'aquestes valls més pròximes a les zones d'esquí es va incrementar més d'un 60% entre 1970 i 2008, amb prop del 82% d'aquesta ocupada en el sector serveis (Lasanta, 2010). Ara bé, aquest sector i el que comporta es veurà influenciat pel canvi climàtic i els seus efectes, fet pel qual les àrees de muntanya han estat considerades com regions especialment vulnerables (Pons et al., 2014). Però no només es pot relacionar la neu amb l'esquí en aquest cas, el present 2019 ha esdevingut un final de primavera amb temperatures baixes, i amb unes nevades tardanes, fet que ha provocat que, per exemple, a una ruta tan visitada com la "Carros de Foc" al Parc Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici, es recomana portar material tècnic com grampons fins a meitats del mes de juliol, degut a la presència de plaques de neu amb pendent i longituds de més de 500 metres, que poden ser molt perilloses en segons quines condicions.

Aquesta sèrie de factors fa que l'oportunitat de conèixer la distribució i variació del mantell nival, i fins i tot d'algunes glaceres del Pirineu, esdevingui una nova font d'informació per una tipologia d'usuaris molt diversa.

Ara bé, la serralada pirinenca presenta una longitud de més de 400 quilòmetres, amb desnivells molt importants i uns hiverns que dificulten l'accés a zones elevades quan aquestes estan cobertes de neu. Això fa que, tot i la importància esmentada anteriorment a escala ecològica i econòmica, la informació continua proporcionant-se a través de la lectura puntual mitjançant 110 perxes i 11 telenivòmetres (Figura 1) repartits pel sistema pirinenc (Ministerio para la Transición Ecológica, 2019).

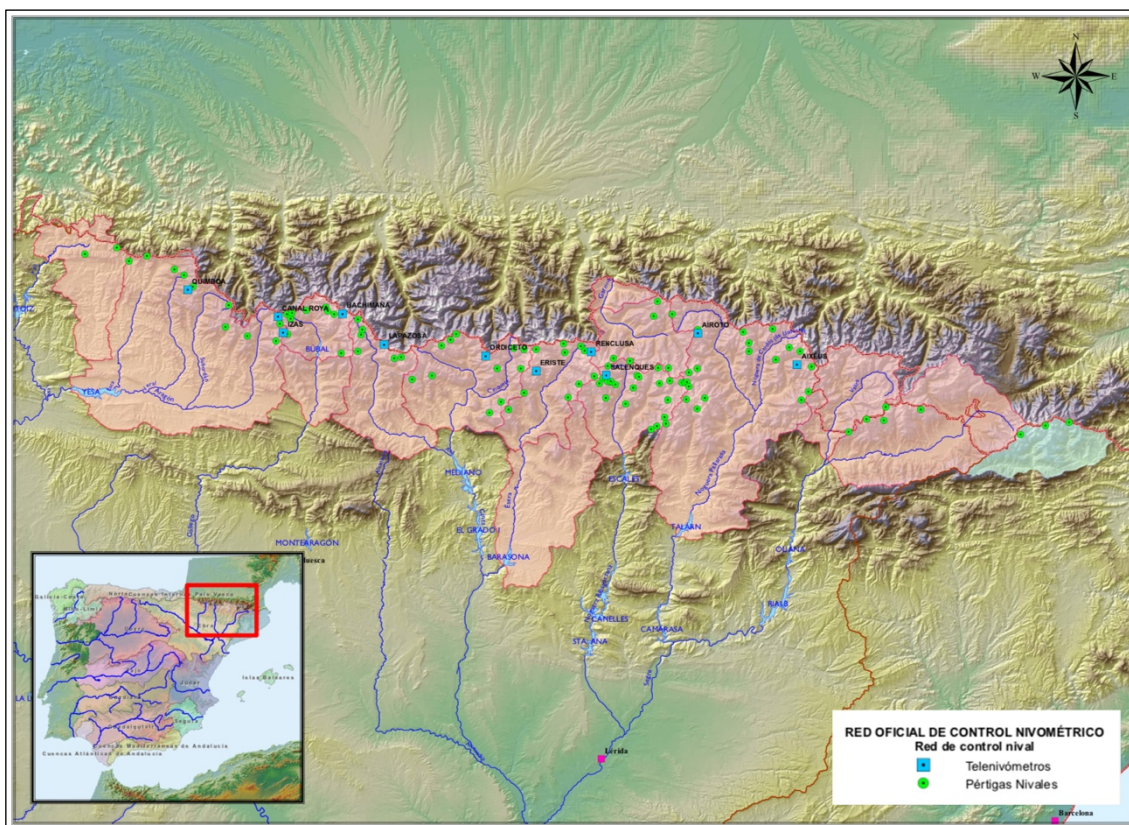


Figura 1. Distribució de pèrtigues i telenivòmetres al Pirineu (Font: Programa ERHIN, 2019).

A partir d'aquesta problemàtica, en els darrers anys s'han introduït noves eines relacionades amb la teledetecció per obtenir aquesta informació, com per exemple la tecnologia LIDAR per mesurar els canvis en algunes glaceres (Revuelto et al., 2013) o l'ús d'imatges de satèl·lit.

L'actual treball analitza la distribució del mantell nival en diverses zones del Pirineu i la representa en una cartografia accessible, fàcil i oberta, a partir de les imatges proporcionades per satèl·lits del programa *Copernicus*, una iniciativa encapçalada per la Comissió Europea en col·laboració amb l'Agència Espacial Europea (ESA). Tot seguit processades a través de programari lliure per obtenir l'evolució espacial i temporal del mantell en aquestes zones.

La discriminació de la coberta nivosa s'efectua a través de l'Índex de Diferència Normalitzada de Neu (NDSI), desenvolupat per Dozier (1989) i continuat per Riggs et al. (1994), utilitzant les diferències entre dues bandes espectrals, la banda verda i la banda de l'infraroig d'ona curta (SWIR) a partir de l'expressió

$$NDSI = \frac{\text{Verd} - \text{SWIR}}{\text{Verd} + \text{SWIR}}$$

resultant una de les metodologies més utilitzades en la determinació del mantell nival a través de dades de teledetecció que distingeix la neu gràcies a la resposta tan diferent entre ambdues bandes, molt reflexiva en el visible i absorbent en l'infraroig d'ona curta (Riihela et al, 2011), i que classifica la neu o el gel com qualsevol píxel que presenti un valor superior a 0,4 (Hall et al, 2002).

2. Objectiu del treball

El principal objectiu d'aquest treball és l'elaboració d'una cartografia dinàmica mitjançant el tractament digital d'imatges provinents de satèl·lits per poder determinar la distribució del mantell nival en determinades zones del Pirineu aragonès i català. Actualment, i des de fa pocs mesos, són accessibles pràcticament de forma setmanal imatges provinents de la missió Sentinel-2, amb una resolució que pot variar de 10 a 60 metres per píxel segons la banda espectral emprada, fet que sumat al seu tractament i processament esdevé una font d'informació en diversos àmbits, com ara l'agronòmic, forestal o mediambiental entre d'altres.

Així, amb l'objectiu de proporcionar una font d'informació útil per diversos sectors i usuaris, aquest s'ha complementat amb una sèrie de punts que són:

- Establir un procés senzill alhora que complet per poder determinar el càlcul de l'Índex de Neu de Diferència Normalitzada (NDSI).
- Determinar la possibilitat d'introduir nous índexs o combinacions de bandes espectrals i millorar la qualitat del resultat final.
- Generar una cartografia de forma recurrent de les zones estudiades.
- Comprovar a través de sortides de camp la validesa de l'índex calculat, com s'ajusta aquest a la realitat en cada moment i comprovar la seva usabilitat en determinades situacions.
- Combinar la cartografia generada amb models de pendent que puguin ser utilitzats en situacions de risc.
- Fer accessible aquesta cartografia perquè pugui ser utilitzada a través d'una plataforma web.

3. Regió de l'estudi

Els Pirineus són una serralada formada per un conjunt de mantells de corriments alpins que van generar un apilament antiformal asimètric d'orientació E-W. Els materials van ser deformats al llarg de dues etapes. La primera, l'orogènia Herciniana, va produir-se a finals del Carbonífer, afectant als materials paleozoics. Posteriorment va donar-se l'orogènia Alpina, des de finals del Cretaci fins al Miocè, afectant als materials presents. Al llarg del Neogen, i fins a l'actualitat, gran part dels materials han estat erosionats per dinàmiques glacials, fluvials i de vessant, donant lloc als relleus que s'observen a dia d'avui (Muñoz, 1992; Berástegui et al., 1993; Capellà i Carreras, 1996; Teixell, 1996).

La cadena de cims s'allarga a través de 430 quilòmetres des de l'Atlàntic fins al Mediterrani, i és en el centre d'aquesta on trobem les zones més elevades, amb els 3.404 metres de la Tuca d'Aneto. Els vessants a banda i banda són totalment diferents, el septentrional cau de forma abrupta, mentre que el meridional ho fa de forma gradual fins arribar a la depressió de l'Ebre. A més, com a conseqüència de l'aixecament produït per l'orogènia Alpina, cap a la conca de l'Ebre afloren importants acumulacions de roques calcàries, entre d'altres materials.

L'àrea d'estudi es localitza en aquesta part central de la serralada (Figura 2), entre dues províncies, Osca i Lleida, i dins d'aquestes engloba diferents comarques que, ordenant-les d'oest a est, són les de La Jacetania, l'Alto Gállego, el Sobrarbe i la Ribagorza a l'Aragó, i seguint per la Vall d'Aran, l'Alta Ribagorça i el Pallars Sobirà a Catalunya. A banda, també s'ha inclòs una zona de la regió francesa de Midi-Pyrénées, al departament d'Hautes-Pyrénées.

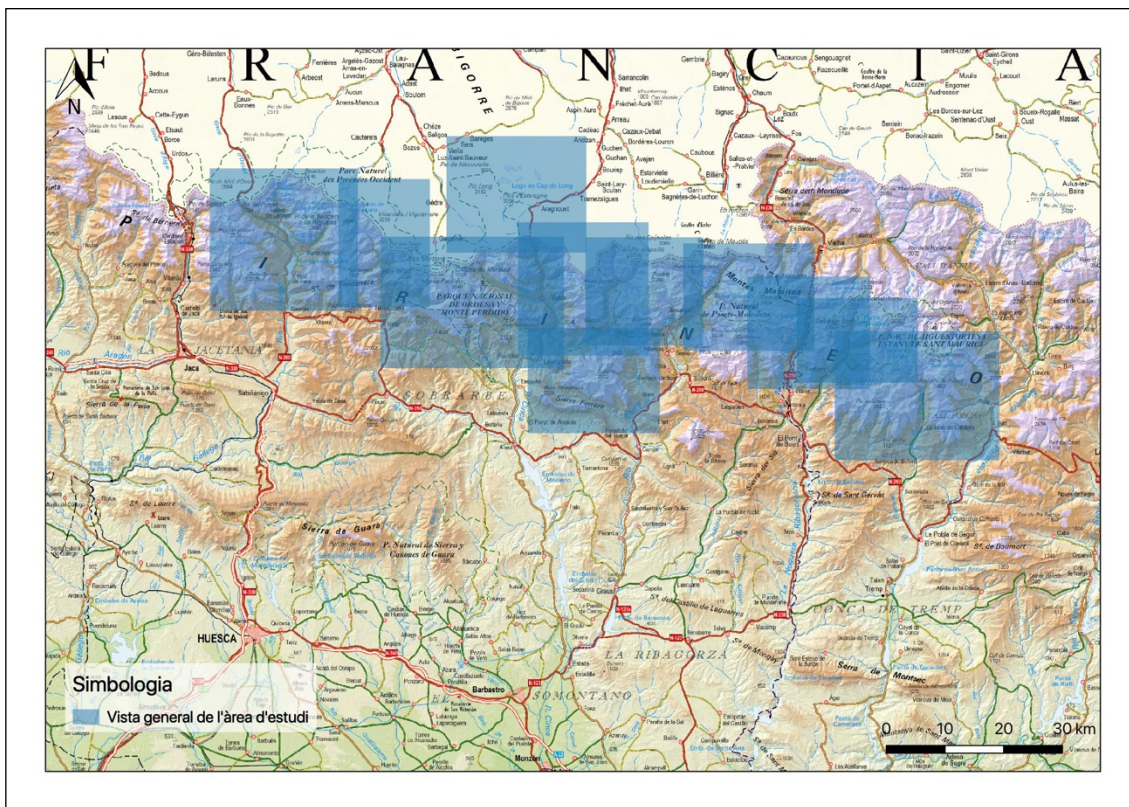


Figura 2. Vista de l'àrea general amb les zones d'estudi delimitades amb els polígons de tonalitat blava

L'autor Juan Buyse, a través del seu llibre "Los tresmiles del Pirineo, un estudio enciclopédico" (1993) recull 212 cims de més de tres mil metres a la serralada, dels quals 129 són cims principals, i 83 secundaris repartits en 11 grans massissos. Doncs bé, el present treball els engloba pràcticament tots a excepció del Massís d'Estats a la zona del Pallars Sobirà, així començant per l'extrem més occidental, Balaitus, Vignemale, Monte Perdido, Néouvielle, La Munia, Bachimala, Posets, Perdiguero, Maladeta i Besiberri hi són presents, i ahora s'afegeixen les zones del Cotiella a la Ribagorça, i la Vall Fosca a cavall entre l'Alta Ribagorça i el Pallars Sobirà.

L'àrea d'estudi es divideix en 11 zones, la zona més occidental és el Valle de Tena, i la més oriental la Vall Fosca, i entremig, zones que recullen el Parc Nacional d'Ordesa i Monte Perdido, el Massís de la Maladeta o part del Parc Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici com a exemples. Així, la Taula 1 recull la distribució de les zones d'estudi a partir de les quals s'ha generat la cartografia amb la distribució del mantell nival, i la Figura 3 representa la situació d'aquestes zones que engloben una part de la regió central de la serralada del Pirineu.

Taula 1. Distribució de les zones d'estudi.

Zona 1	Valle de Tena
Zona 2	Vignemale – Bujaruelo
Zona 3	Ordesa – Monte Perdido
Zona 4	Bielsa – Bal de Chistau
Zona 5	Cotiella
Zona 6	Posets
Zona 7	Aneto – Maladeta
Zona 8	Tuca de Mulleres – Besiberri
Zona 9	Vall de Boí
Zona 10	Vall Fosca
Zona 11	Piau - Aragnouet

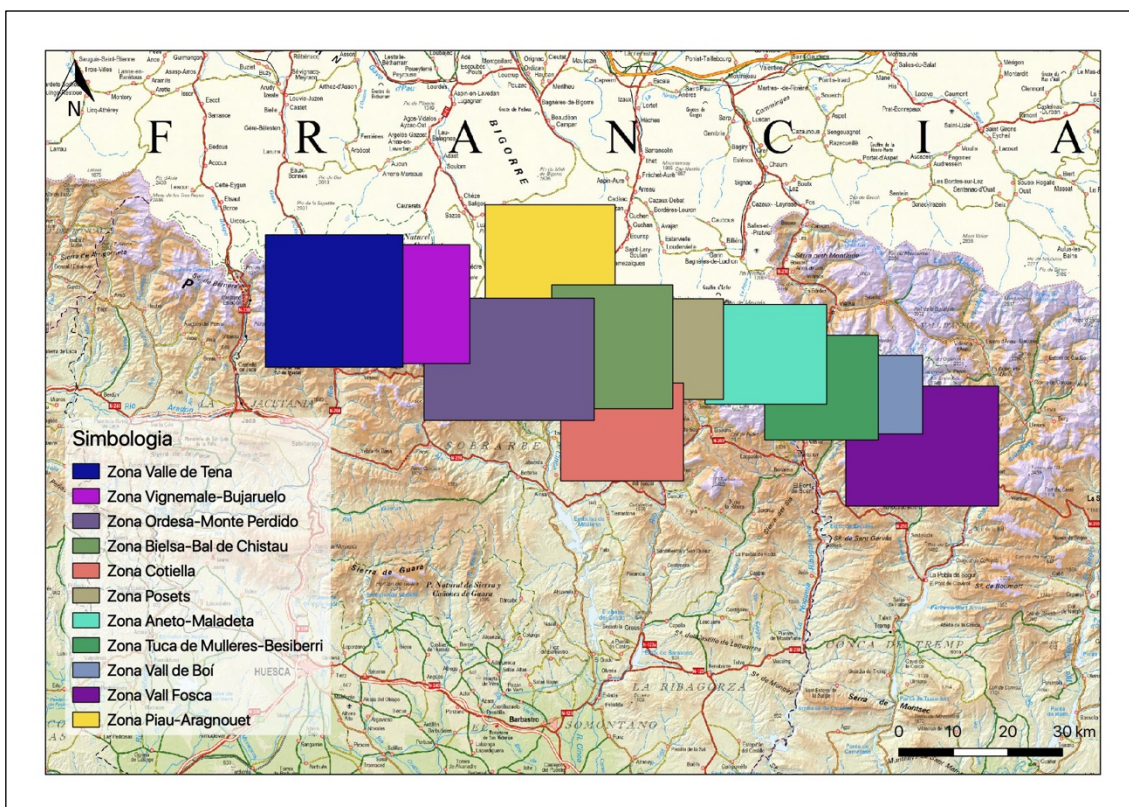


Figura 3. Situació de cadascuna de les zones d'estudi i el solapament entre cadascuna.

Aquestes zones, a diferència de la resta del país, on les precipitacions en forma de neu són poc habituals o inexistents al llarg de l'any, registren més de 30 dies de neu a l'any per sobre dels 1.500 metres d'altura (Instituto Geográfico Nacional i Ministerio de Fomento, 2018).

El volum d'activitats hivernals en aquestes zones va en augment, i paratges com tot l'entorn de l'Anayet, Panticosa o la Serra de Partacua al Valle de Tena, tenen un gran nombre de visitants en els mesos més freds. La zona d'Ordesa i Monte Perdido rep una gran quantitat de persones, i un exemple és l'any del seu centenari, en el qual més de 600.000 persones van visitar els seus boscos, senders o cims (Dario, R., 2018). De la mateixa forma, la zona del Parc Natural de Posets-Maladeta, rep de forma anual més de 9.000 visitants, i durant la temporada d'hivern, la capçalera del riu Ésera rep una gran quantitat d'esquiadors i persones que realitzen activitats relacionades directament amb la presència de la neu (Memoria de gestión Parque Natural Posets - Maladeta, 2017). Seguint en direcció est, la Vall Fosca resta encara “verge”, sent una de les poques valls del Pirineu que no té

estacions d'esquí, malgrat els intents, i aquest paisatge fa que molts aficionats a aquests tipus d'esports visitin aquesta zona, inclús cada any es celebra una cursa d'esquí de muntanya durant el mes de febrer, cursa amb una tradició de més de 14 anys. Per últim, cal comentar que la zona del Cotiella, és possiblement la zona amb menys importància i afluència de visitants, però és un cim simbòlic si es transita per carreteres que s'aproximen a la ciutat de Lleida circulant des del sud (com és el cas de la carretera que uneix la població d'Albatàrrec i la capital del Segrià) el Cotiella s'aixeca en forma de piràmide (Figura 4) i serveix d'indicador en episodis de nevades.



Figura 4. Vista de la ciutat de Lleida amb la Seu Vella i el Cotiella nevada al fons de la fotografia (Font: Edgar Aldana).

4. Metodologia

4.1 Procés metodològic

La base del procés metodològic és la utilització d'imatges Sentinel-2 (Copernicus Open Access Hub, 2019), sobre una base del Mapa Topogràfic Nacional a escala 1:25.000, i també el model digital del terreny (CNIG, 2019) amb un pas de malla de 5 metres que s'utilitzarà per elaborar mapes de pendents en cadascuna de les zones.

El processament de les imatges Sentinel-2 permet obtenir l'NDSI amb una resolució espacial de 20 metres en cadascuna d'aquestes, per així generar la cartografia amb la distribució del mantell nival en els diferents moments temporals. Un cop generada, es compara amb les observacions realitzades a les sortides de camp i amb les dades meteorològiques recollides per la xarxa d'estacions de l'Agència Estatal de Meteorologia en el cas de l'Aragó, i en el cas de Catalunya, a través de les estacions del Servei Meteorològic de Catalunya. Alhora, i mitjançant el model digital del terreny, es crea una capa addicional amb l'objectiu de delimitar les zones amb pendents a partir d'una determinada altitud que en situacions determinades poden esdevenir situacions de risc o perill.

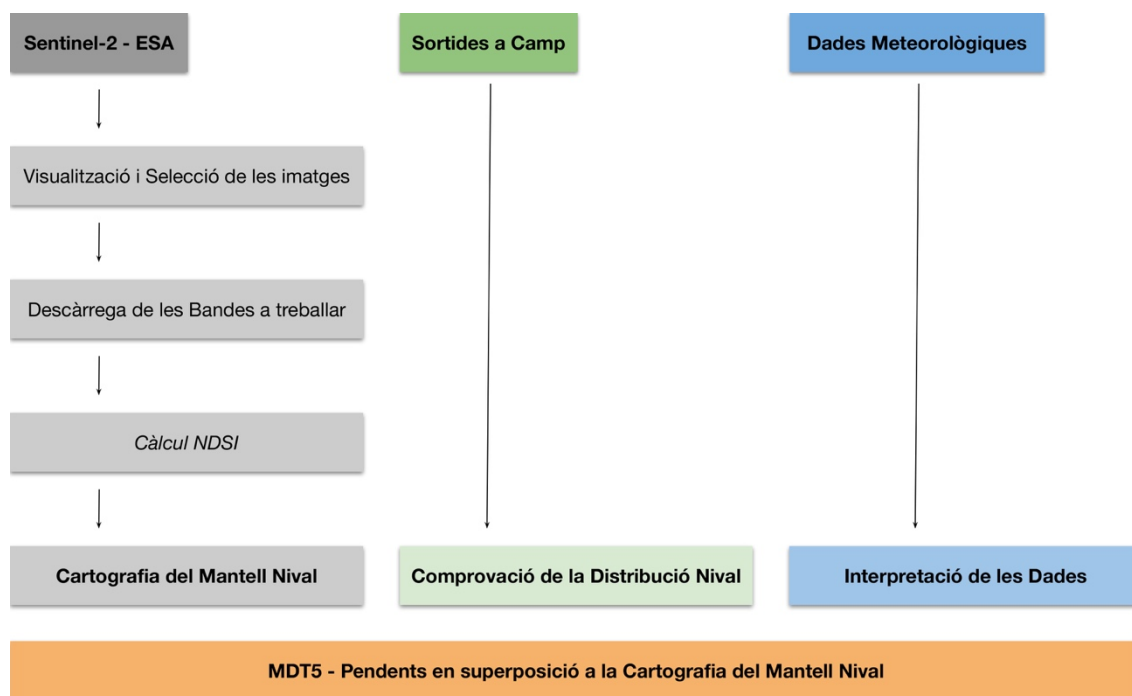


Figura 5. Esquema general del procés metodològic.

4.2 Obtenció de la informació

En aquest punt concret del treball es vol remarcar que la informació utilitzada en tot moment prové de fonts obertes, per aquest motiu s'enumeren les utilitzades.

Imatges de Satèl·lit

Les imatges que s'obtenen dels satèl·lits són la base d'aquest treball, i gràcies l'avenç en termes de qualitat i freqüència vers la seva disponibilitat en l'àrea d'estudi, resulta possible determinar la distribució del mantell nival d'una forma relativament regular a nivell de temporalitat i amb una resolució que permet incorporar usos com ara el que puguin fer terceres persones en un sector com el turisme actiu de muntanya que està a l'alça.

El projecte Sentinel té un caràcter multisatèl·lit, desenvolupat per l'ESA en el marc del Programa Copernicus. Aquest projecte disposa de diverses missions, que alhora inclouen diferents satèl·lits i possibilitats com són radars en alguns casos, i imatges espectrals en d'altres amb l'objectiu de supervisar el medi terrestre, oceànic i atmosfèric del planeta Terra:

- **Sentinel-1:** és una missió de tipus radar a la òrbita polar capaç de proporcionar imatges en qualsevol condició meteorològica, amb l'objectiu d'estudiar la superfície terrestre i oceans.
- **Sentinel-2:** és una missió de tipus multiespectral amb una alta resolució a l'òrbita polar, amb el propòsit de monitoritzar la superfície terrestre analitzant la coberta vegetal, els usos del terreny i de les aigües, els cabals dels rius i les zones costaneres. En aquest cas, el primer satèl·lit (Sentinel-2A) es van posar en òrbita el 23 de juny de 2015, i el segon (Sentinel-2B) ho va fer el 7 de març de 2017.

- **Sentinel-3:** disposa de diferents instruments per mesurar l'elevació, la temperatura o el color de la terra i dels oceans amb una gran precisió i fiabilitat, contribuint significativament als serveis de pronòstic marítim i de la monitoratge del clima i el medi ambient.
- **Sentinel-4:** és una eina transportada pel satèl·lit MetOp de Segona Generació que s'encarregarà de monitorar l'atmosfera del planeta.
- **Sentinel-5 i 5 Precursor:** són uns satèl·lits que observen la química de l'atmosfera per així poder monitorar la qualitat de l'aire, mesures de l'ozó, el diòxid de nitrogen, el diòxid de sofre i altres tipus de contaminants.
- **Sentinel-6:** té per objectiu mantenir les missions d'altimetria de precisió després del satèl·lit Jason-2.

En aquest cas, la missió Sentinel-2 proporciona la informació necessària per poder dur a terme els objectius del treball. El motiu de la tria d'aquesta missió és la disponibilitat de 13 bandes multiespectrals, amb una resolució de 10 a 60 metres (Taula 2) i amb la característica de tractar-se d'una informació totalment oberta, i actualment, i a causa de la presència dels dos satèl·lits que completen la missió (Sentinel-2A i Sentinel-2B), la disponibilitat d'imatges en cadascuna de les àrees d'estudi pot arribar a ser setmanal o encara menor, i encara es podria incrementar combinant informació d'altres satèl·lits com el Landsat 8 (Li i Roy, 2017).

Taula 2. Bandes i característiques disponibles en Sentinel-2.

Banda	Resolució (metres)	Longitud d'ona central (nanòmetres)	Descripció
B1	60	443	Ultra Blau (Costa i Aerosol)
B2	10	490	Blau
B3	10	560	Verd
B4	10	665	Vermell
B5	20	705	Visible i Infraroig Proper (VNIR)
B6	20	740	Visible i Infraroig Proper (VNIR)
B7	20	783	Visible i Infraroig Proper (VNIR)
B8	10	842	Visible i Infraroig Proper (VNIR)
B8a	20	865	Visible i Infraroig Proper (VNIR)
B9	60	940	Infraroig Ona Curta (SWIR)
B10	60	1.375	Infraroig Ona Curta (SWIR)
B11	20	1.610	Infraroig Ona Curta (SWIR)
B12	20	2.190	Infraroig Ona Curta (SWIR)

Les imatges proporcionades pels satèl·lits Sentinel 2A i 2B aporten dos tipus de nivells o producte final, essent el Nivell 2A l'utilitzat en aquest treball a causa de les seves característiques:

- **Sentinel-2 Nivell 1C:** imatges corregides atmosfèricament per sota de l'atmosfera (Top-of-atmosphere, TOA).
- **Sentinel-2 Nivell 2A:** imatges corregides atmosfèricament a nivell del terra (Bottom-of-atmosphere, BOA). Aquestes milloren l'aspecte visual d'una banda, i de l'altre proporcionen valors que no estan influïts per l'atmosfera.

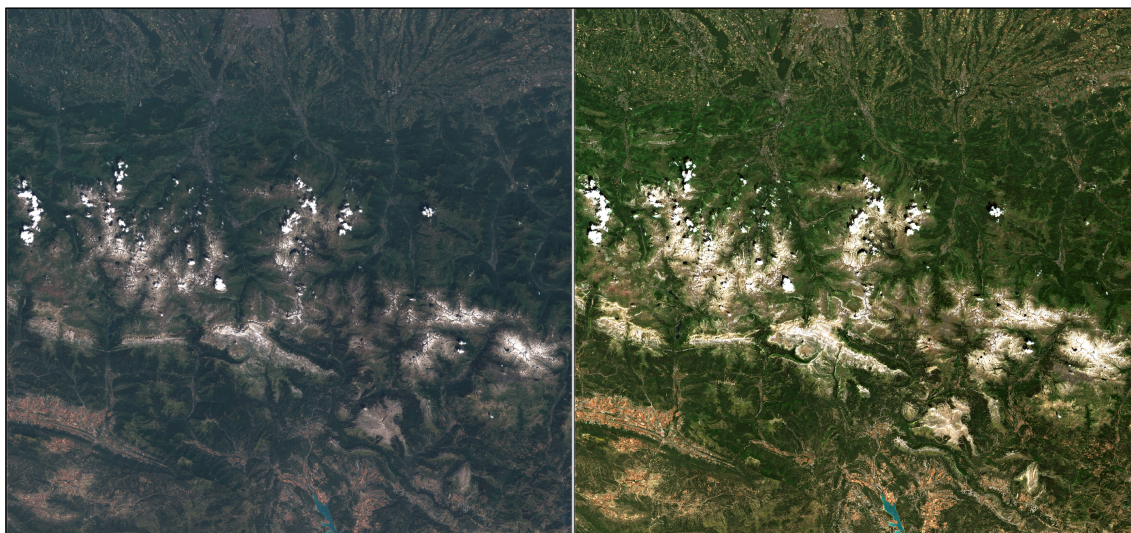


Figura 6. Comparativa de les imatges Sentinel-2 segons el tipus de nivell de la mateixa àrea i moment. A l'esquerra, Nivell 1C, i a la dreta Nivell 2A.

La informació està disponible en la pàgina web *Copernicus Open Acces Hub* (<https://scihub.copernicus.eu>) de l'Agència Espacial Europea, en la qual també està disponible informació d'altres missions com ara la Sentinel 1 i 3.

Tanmateix, s'ha treballat amb imatges que permetien analitzar les zones lliures de núvols, amb tot, cal comentar que s'han incorporat dates puntuals amb presència d'aquests en algunes de les zones que limiten l'anàlisi de la coberta, però que també permeten observar les possibilitats i resultats finals obtinguts.

Així, les dates i imatges seleccionades es mostren a la següent taula (Taula 3), començant pel mes de novembre de l'any 2018, mostrant de forma gràfica la disponibilitat de les imatges al llarg del període d'estudi. Aquestes presenten en la seva majoria les zones lliures de núvols, però hi ha moments puntuals amb àrees poc extenses cobertes per diferent tipus de nuvolositat, per aquesta raó, amb les dates senyalades s'especifica el número de la zona que es troba afectada per núvols. També, resta senyalada la data del 6 de gener de 2019 amb un asterisc (*) perquè la imatge disponible presenta un gran nombre de zones afectades amb una nuvolositat molt prima que ha afectat la resposta final com es veurà en el corresponent apartat dels Resultats.

Taula 3. Dates amb la disponibilitat de les imatges Sentinel-2 seleccionades i amb la numeració de les zones afectades per nuvolositat en cada data.

Any	2018		2019									
Dia	Nov	Des	Gen	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Oct
1												
2												
3												
4												
5												
6			(8) (9) (10)									
7												
8												
9												
10												
11			(*)									
12		(1) (8) (11)			(1) (2) (7) (8)							
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												
23												
24												
25												
26												
27		(10) (11)										
28												
29												
30												
31												

Model Digital del Terreny

El model digital del terreny (MDT) utilitzat en aquest cas s'ha obtingut del Centre Nacional d'informació Geogràfica, amb un pas de malla de 5 metres, i una distribució dels fulls segons el MTN50. L'arxiu que s'obté de la descàrrega es troba en format ASCII matriu ESRI (.asc), i el sistema geodèsic és l'ETRS89 i la projecció en el fus corresponent a cada full, utilitzant el fus 30 i 31 per zones estudiades. Així, els fulls emprats són:

Fulls utilitzats per elaborar el model digital del terreny															
145	145(B)	146	147	148	149	177	178	179	180	181	210	211	212	213	214

Registre de Dades Meteorològiques

La meteorologia té un paper clau en molts sectors, des d'àmbits estrictament mediambientals com el forestal o agrícola, fins al turisme, que està estretament relacionat amb la meteorologia, i encara més en una zona com el Pirineu que especialment durant els mesos més freds de l'any basen la seva economia en el sector terciari (Palomares, 1982).

L'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET) disposa d'una xarxa d'estacions meteorològiques repartides per tot el país, gairebé 800 que recullen dades de forma horària registres de temperatura,

vent, precipitació, pressió atmosfèrica o humitat relativa. Al Pirineu aquestes estan situades en les localitats com Hecho, Canfranc, Biescas, Torla o Bielsa a l'Aragó, i Arties, Vall de Boí, Torre de Capdella o Esterri d'Àneu com estacions situades dins la zona d'estudi. Ara bé, la majoria d'aquestes es localitzen en els propis de nuclis urbans o voltants.

D'altra banda el Servei Meteorològic de Catalunya (Meteocat) disposa d'unes 190 estacions automàtiques repartides per tota la superfície catalana, que enregistren dades cada 30 minuts. Com ara temperatura, humitat relativa, precipitació, vent o irradiació solar, a més, en algunes d'aquestes es disposa dels valors de l'evapotranspiració de referència (ET_o), emprada en l'àmbit de l'agricultura per determinar les necessitats hídriques dels cultius. La principal diferència en aquest cas vers la xarxa d'estacions de l'AEMET, recau en la seva localització, algunes es troben en zones aïllades i amb una altura sobre el nivell del mar elevada, aportant en aquest cas una informació més acurada, ja que hi ha estacions per sobre dels 2.000 metres. Per exemple, estacions com la situada al Lac Redon (2.247 metres), a Boí, entre el Clot de la Mina i el Barranc del Muntanyó (2.535 metres), o a Espot, situada a la vessant nord-oest del Bony de les Picardes (2.519). Essent només un exemple, fet que cap al Pirineu català més oriental també s'hi troben altres en condicions similars.

Així, en la següent taula (Taula 4) es recullen les estacions a partir de les quals s'han extret les dades meteorològiques per poder relacionar els valors obtinguts en l'índex NDSI amb l'estat del mantell nival.

Taula 4. Llistat de les estacions utilitzades en la presa de dades meteorològiques.

Xarxa	Estació	Municipi	Fus	Coordenades X (m)	Coordenades Y (m)	Altura (m.s.n.m)
AEMET	Torla	Torla	30	736.719	4.724.602	1.078
AEMET	Bielsa	Bielsa	31	272.431	4.723.462	992
Meteocat	Lac Redon	Vielha e Mijaran	31	317.899	4.723.047	2.247
Meteocat	Boí	La Vall de Boí	31	326.043	4.703.690	2.535
Meteocat	Espot	Espot	31	340.252	4.710.916	2.519

La localització de les estacions (Figura 7) engloba pràcticament cadascuna de les valls, des de la Vall del Riu Ara (Torla), passant per la del Cinca (Bielsa), per després saltar a la zona de Catalunya on es troben ubicades al voltant del Parc Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici i el seu perímetre. Cal destacar però, que a la Vall de l'Ésera no s'ha trobat cap dada disponible, treballant amb les dades de l'estació del Lac Redon com a referència per una zona tan coneguda com el Massís de la Maladeta.

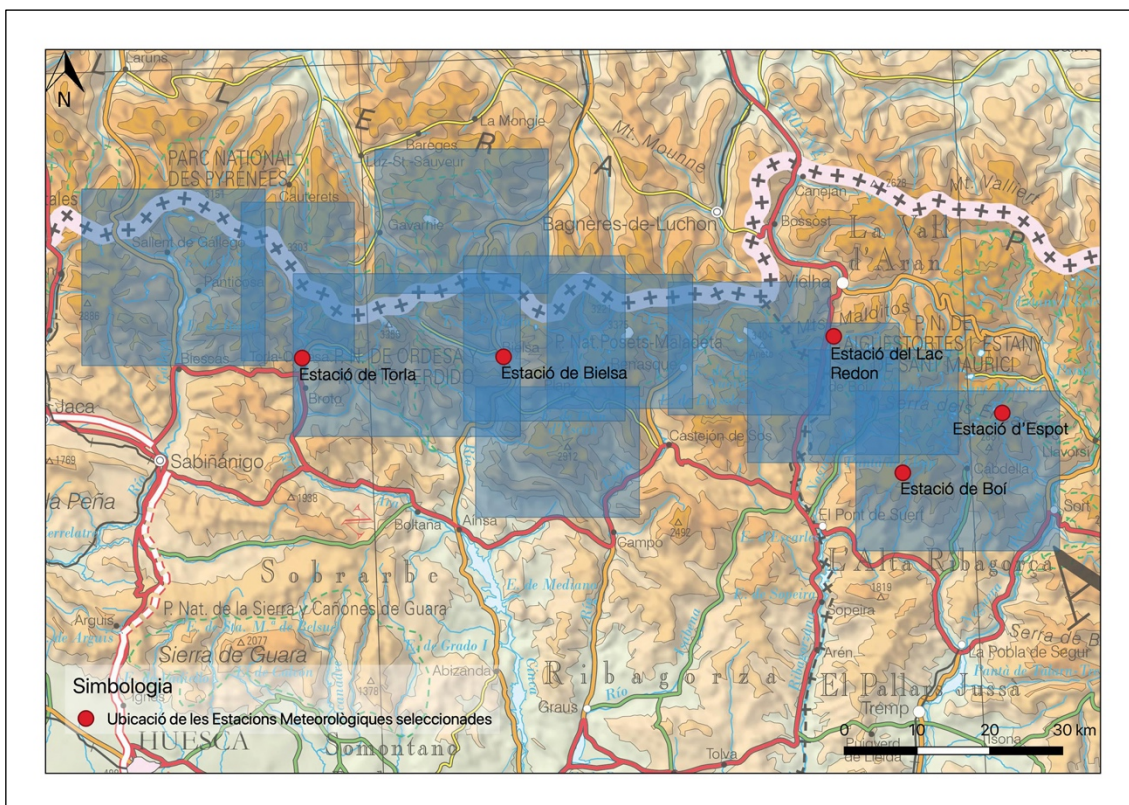


Figura 7. Ubicació de les estacions meteorològiques a partir de les quals s'han descarregat les dades.

4.3 Processament de les imatges

El tractament de les imatges amb el propòsit de poder determinar la distribució del mantell nival segueix una sèrie de passos (Figura 8).

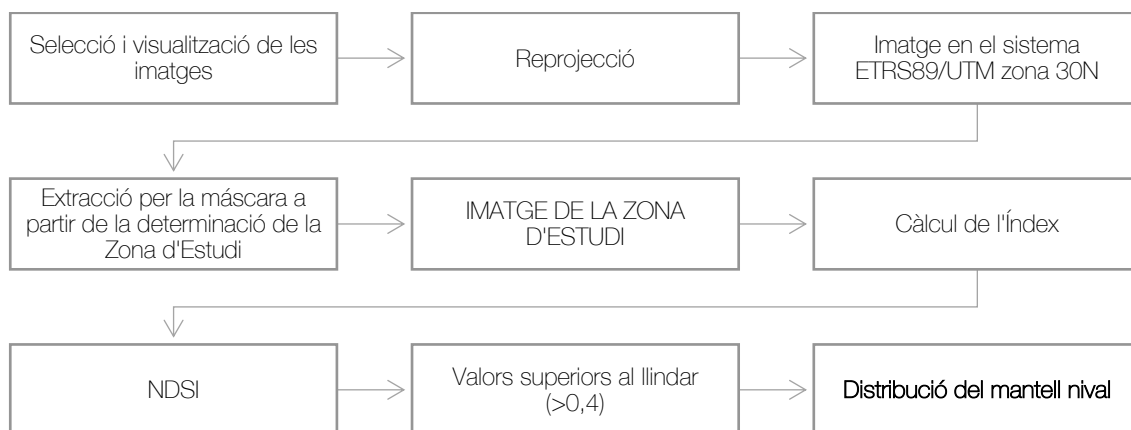


Figura 8. Representació dels passos a realitzar per poder obtenir la representació de la distribució del mantell nival.

Processament de les imatges

Un dels objectius del present treball és crear una cartografia accessible i aprofitable per un ampli ventall d'usuaris i per fer-ho possible, s'ha optat des d'un principi per una font d'informació oberta, seguit de l'ús de programari lliure per poder realitzar el processament d'aquesta informació.

La determinació de la distribució del mantell nival a partir de les imatges dels satèl·lits Sentinel 2A i 2B s'han processat mitjançant el software lliure QGIS versió 2.18.

4.3.1 Visualització prèvia i selecció de les imatges

Les imatges són una font d'informació de l'ESA, i la seva descàrrega es duu a terme a partir de la seva base de dades integrada a la pàgina web comentada anteriorment *Copernicus Open Access Hub* (<https://scihub.copernicus.eu>), però la visualització prèvia de les imatges a través d'aquesta web no resulta fàcil si anteriorment no es descarrega la imatge. Per evitar-ho, existeix una alternativa que permet la visualització d'aquestes sense la necessitat de fer la descàrrega a través d'un visor, cosa que permet determinar si les zones objecte de l'estudi es troben sense nuvolositat.

Aquest visor rep el nom de *Land Viewer* (<https://eos.com/landviewer>), i s'hi troben disponibles imatges de diferents satèl·lits de forma actualitzada. En conseqüència es pot visualitzar de forma senzilla (Figura 9) si les zones d'interès presenten nuvolositat, ja que cal remarcar que es tracta de zones amb una elevada presència de núvols, entre 80 i 120 dies amb nuvolositat durant les hores de Sol i només entre 60 i 90 estan aclarits (Garcia, 1982).

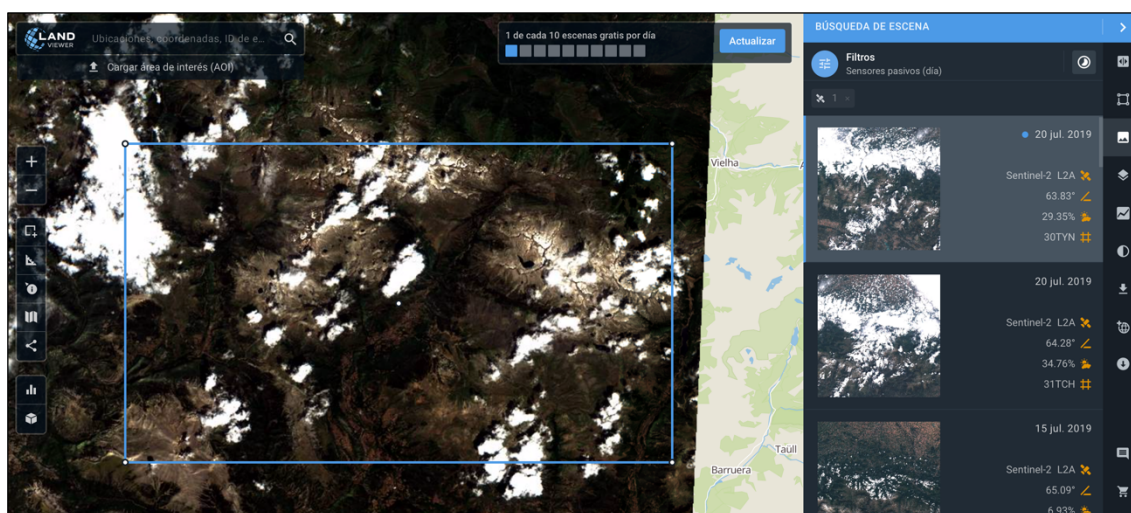


Figura 9. Captura de la informació que proporciona el visor *Land Viewer*, en aquest cas es pot veure com la zona de l'Aneto al marge dret del rectangle blau té certa nuvolositat.

Un cop es valida la imatge, es descarrega la informació necessària, essent les bandes 3 i 11 (Figura 10) de cadascuna de les imatges, amb una resolució de 20 metres per píxel, encara que la banda 3 es pot descarregar amb una major resolució, però per tal de no treballar amb píxels de resolucions diferents, es descarrega la imatge de la banda 3 amb la resolució de 20 metres per píxel. El fet de treballar únicament amb aquestes bandes agilitza el procés, ja que cada imatge té una mida al voltant de 20 a 40 megabytes, i contempnen una superfície de 100 quilòmetres quadrats. Les imatges es troben georreferenciades en WGS 84, i a través del software QGIS es reprojecta el sistema de coordenades a l'ETRS89, uns passos que s'efectuen per cadascuna de les bandes (de no fer-ho pot donar problema de valors en les imatges resultants del càlcul del valor NDSI).



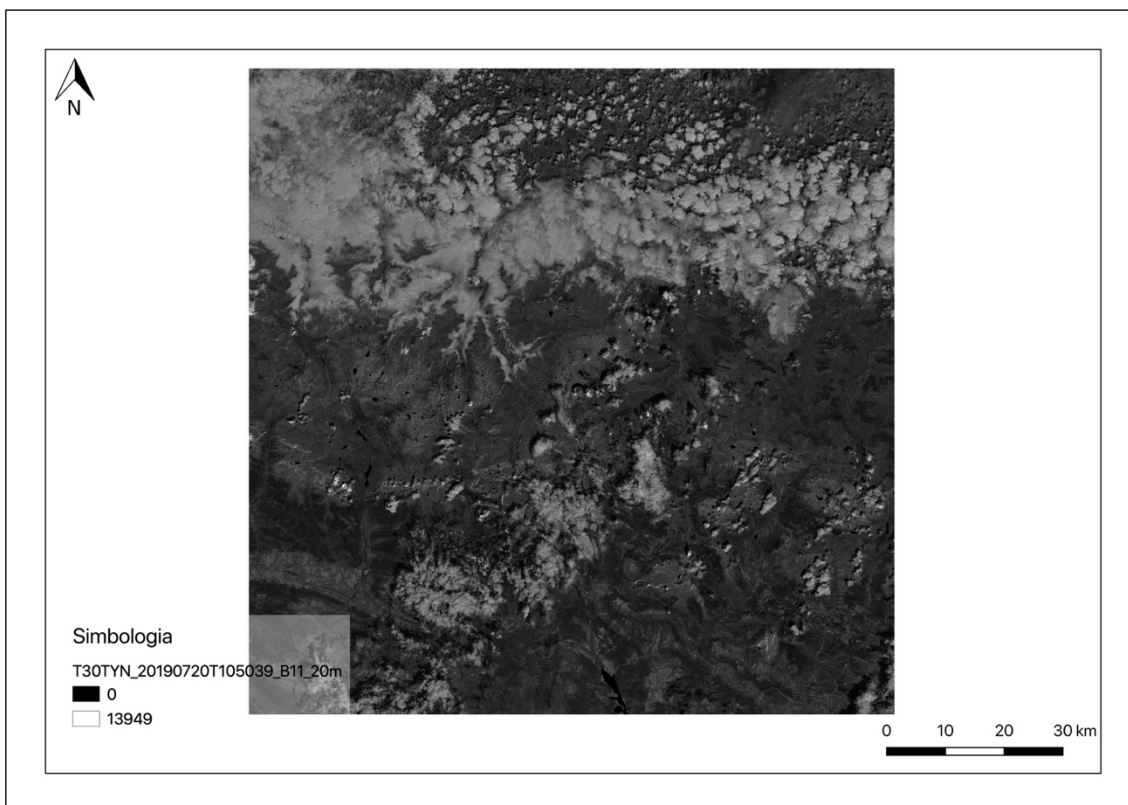


Figura 10. Imatge original amb la banda 11 a data del 20 de juliol de 2019 amb presència de nuvolositat.

4.3.2 Càlcul de l'Índex de Diferència Normalitzada de la Neu

La metodologia proposada per a la detecció de la neu, com ja s'ha comentat anteriorment, està contrastada i estudiada (Dozier, 1989; Riggs et al, 1994; Cea et al., 2007), basada en el *Normalized Difference Snow Index* (NDSI), i utilitzant la banda 3 (verd; 560 nm) i la banda 11 (infraroig d'ona curta; 1.610 nm).

$$NDSI = \frac{\text{Banda 3 (560 nm)} - \text{Banda 11 (1.610 nm)}}{\text{Banda 3 (560 nm)} + \text{Banda 11 (1.610 nm)}}$$

Amb posterioritat s'estableix el llindar de l'índex, que serà superior a 0,4 (Hall et al., 2002) per a la diferenciació de la coberta de neu. En cas de treballar amb valors inferiors fa que superfícies com ara paviments artificials, roques, sòl nu o vegetació restin seleccionats, per exemple segons autors com Kulkarni et al. (2002), els paviments artificials, les roques i els sòls naturals tenen un valor entre 0,1 i -0,3 aproximadament, mentre que la vegetació es situa al voltant de -0,5. A banda però, s'han trobat altres propostes d'índexs (Pérez, 2015), com ara el *Normalized Difference Snow / Ice Index* (NDSII 2), que utilitza el següent algoritme:

$$NDSII\ 2 = \frac{\text{Banda 3 (560 nm)} - \text{Banda 8 (842 nm)}}{\text{Banda 3 (560 nm)} + \text{Banda 8 (842 nm)}}$$

I també un segon com és el *Normalized Difference Snow and Ice Index* (NDSII TM), determinat a través de la següent operació:

$$\text{NDSII TM} = \frac{\text{Banda 4 (560 nm)} - \text{Banda 8 (842 nm)}}{\text{Banda 4 (560 nm)} + \text{Banda 8 (842 nm)}}$$

El primer d'aquests, l'NDSII 2 presenta uns resultats amb una interpretació diferent, ja que segons el llindar establert amb els altres dos índexs, aquest identifica masses d'aigua (llacs i embassaments) amb valors d'1, mentre que la superfície innivada la situa amb valors de 0,04 a 0,06 (Figura 11), molt per sota del llindar establert de 0,4. És un índex amb moltes possibilitats en un futur perquè podria diferenciar tipus de neu (Pérez, 2015), però que en el present treball s'ha descartat per la manca d'experiència i informació.

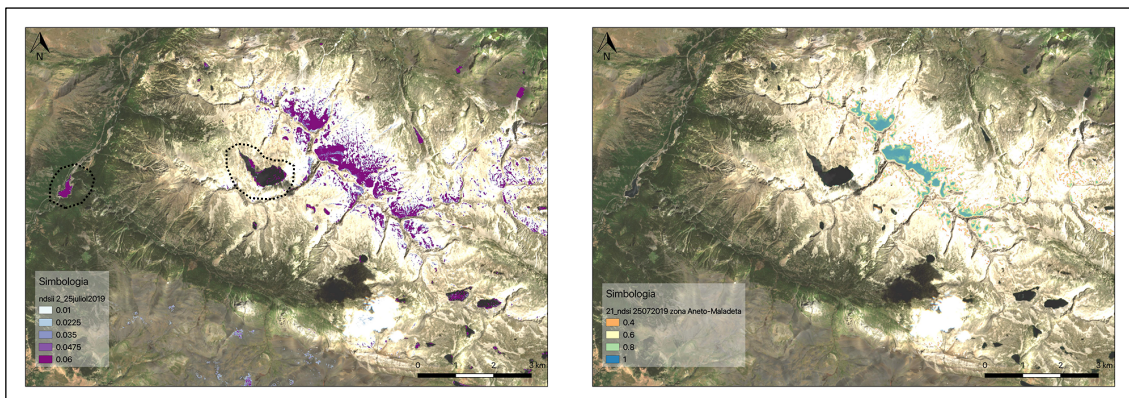


Figura 11. Exemple dels índexs NDSII 2 (esquerra) en comparació amb l'NDSI (dreta) a la zona de "l'Ibón de Cregüña (Osca)" en una imatge amb data de 25 de juliol de 2019, es pot observar com al primer dels índexs, les masses d'aigua també es remarquen en llacs i embassament de la zona.

Per contra, l'NDSII TM presenta menors diferències vers l'NDSI, però els valors sempre són més elevats, fet que implica l'increment del llindar. Un increment que no delimita de forma correcta la neu, i si aquest es disminueix, pot agafar zones d'ombra i sense neu (Pérez, 2015).

Així doncs, l'índex NDSI és el que millor representa fins al moment el mantell nival fixant el llindar per sobre del valor 0,4 essent capaç de distingir la neu d'altres elements com són la nuvolositat en segons quines situacions o i per exemple roques amb tonalitats clares com són les calcàries, una característica important quan es treballa sobre zones com el Massís d'As Tres Serols (Monte Perdido), el més alt d'Europa amb aquest tipus de geologia, gràcies a que la banda 3 recull el punt on la superfície de neu presenta major reflectivitat, mentre que la banda 11 té l'efecte contrari, amb el tram amb menor reflectivitat (Riihela et al, 2011).

D'aquesta forma, i mitjançant el software QGIS, s'estableix el llindar de valors superiors a 0,4 com a neu o gel, mentre que la resta que queda per sota (< 0,4) es classifiquen en un rang amb un color transparent tal com es mostra en la Figura 12.

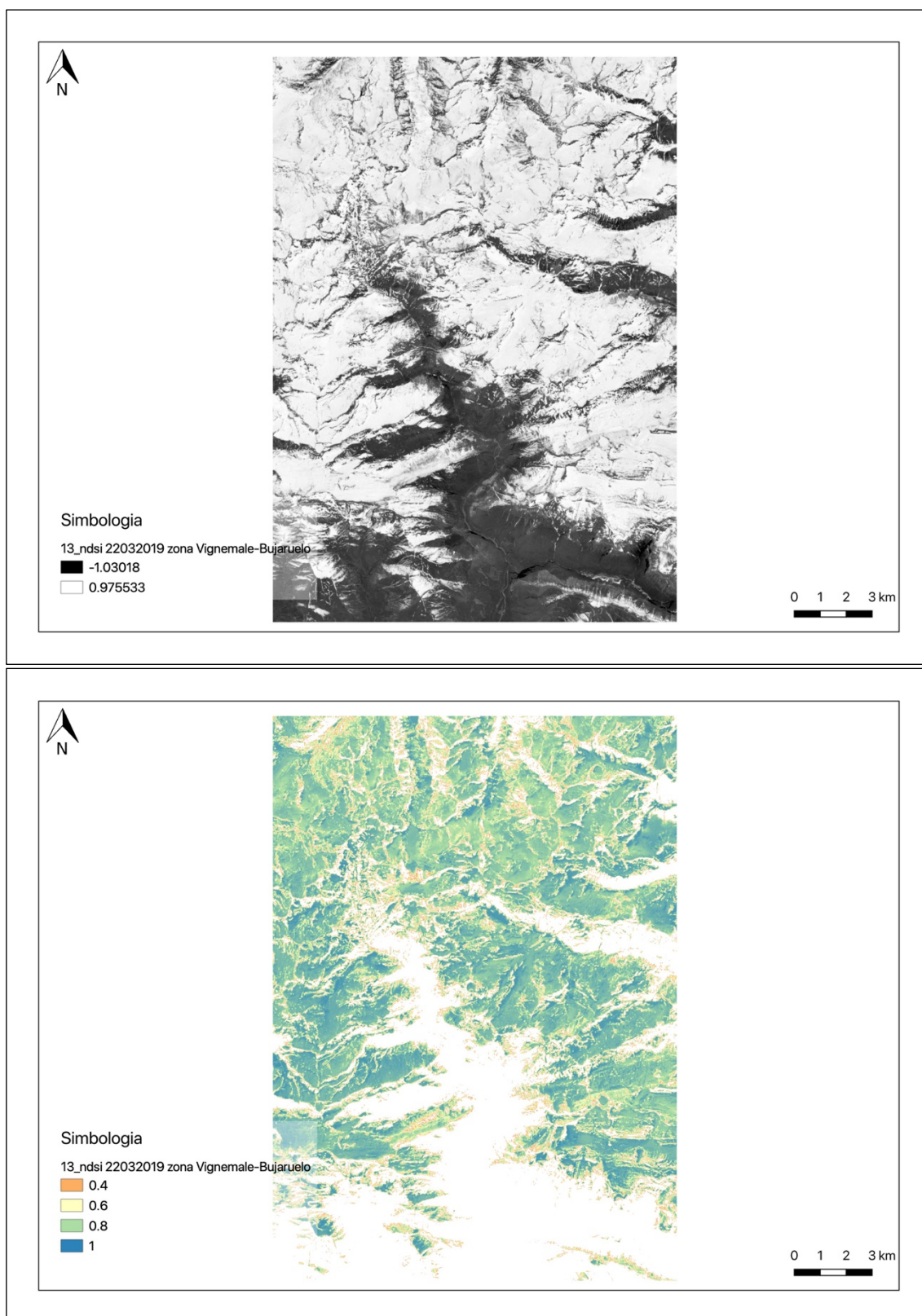


Figura 12. Exemple amb la imatge en brut d'una de les zones en la part superior i la imatge després de realitzar la classificació dels valors.

4.4 Sortides de Camp a les zones d'estudi

Els estudis anteriors en l'ús de l'índex NDSI (Dozier, 1989; Riggs et al., 1994; Hall et al., 2002; Salomonson i Appel, 2004; Hall i Riggs, 2011) i el resultat del processament de les imatges permet

veure com es distribueix el mantell nival al llarg del temps, però resulta imprescindible veure quina informació pot aportar per un usuari final com ara un senderista, un esquiador, un guia, etc.

La resposta per aquesta qüestió no resulta fàcil, ja que per fer-ho cal que els usuaris utilitzin la informació generada, però amb l'objectiu de veure part de la seva utilitat *in situ* es van dur a terme una sèrie de sortides per les àrees objecte de l'estudi. Sortides de senderisme i esquí de muntanya preferentment, dos tipus d'activitats que poden tenir en aquest tipus de cartografia, una font d'informació molt útil per poder realitzar la planificació d'aquestes, ja sigui en termes de seguretat (un aspecte clau a la muntanya, especialment a l'hivern), o simplement en la presa de decisions per decidir realitzar o no l'activitat.

Les sortides de camp s'han dut a terme en diferents moments, iniciant aquestes al novembre de l'any 2018, i comptabilitzant la darrera durant el mes d'agost de 2019. D'aquesta manera, s'han pogut observar de les primeres neus de l'hivern, fins a les darreres plaques en cotes baixes (Peña Foratata, 16 de juny de 2019), i acabar per veure des del Pic de Paderna (Figura 13) com aflorava el gel de la Glacera de la Maladeta durant els inicis del mes d'agost (Taula 5).

Taula 5. Resum de les sortides realitzades.

Data	Número de Zona	Zona d'estudi	Paratge	Activitat
17/11/2018	1	Valle de Tena	Garmo Negro	Senderisme
24/11/2018	7	Aneto – Maladeta	Punta Gallinero	Esquí de Muntanya
01/12/2018	4	Bielsa – Bal de Chistau	Puerto Viejo de Bielsa	Senderisme
06/12/2018	3	Ordesa – Monte Perdido	"Ibones" de la Larri	Senderisme
23/12/2018	9	Vall de Boí	Cap de les Raspes Roies	Esquí de Muntanya
24/12/2018	7	Aneto – Maladeta	Collada de Basibé	Esquí de Muntanya
25/12/2018	7	Aneto – Maladeta	Punta Gallinero	Esquí de Muntanya
01/01/2019	7	Aneto – Maladeta	Collada de los Bucardos	Senderisme
20/01/2019	7	Aneto – Maladeta	Plan d'Aigualluts	Senderisme
26/01/2019	11	Piau – Aragnouet	Pic de l'Aiguillete	Esquí de Muntanya
16/02/2019	1	Valle de Tena	Punta Narronal	Esquí de Muntanya
03/03/2019	11	Piau – Aragnouet	Port de Campbieil	Esquí de Muntanya
10/03/2019	7	Aneto – Maladeta	Pic de Sacroux	Esquí de Muntanya
17/03/2019	1	Valle de Tena	Punta Espelunciecha	Esquí de Muntanya
24/03/2019	7	Aneto – Maladeta	"Ibón" de Renclusa	Esquí de Muntanya
14/04/2019	7	Aneto – Maladeta	Collada Perdiguieret	Esquí de Muntanya
19/04/2019	3	Ordesa – Monte Perdido	Cuello Arenas	BTT
20/04/2019	3	Ordesa – Monte Perdido	Comodoto	BTT
01/05/2019	9	Vall de Boí	Pas de Llevata	Esquí de Muntanya
04/05/2019	7	Aneto – Maladeta	Les Fites del Perdiguieret	Esquí de Muntanya
19/05/2019	7	Aneto – Maladeta	Tuqueta Arnau	Esquí de Muntanya
16/06/2019	1	Valle de Tena	Peña Foratata	Senderisme
18/07/2019	5	Cotiella	"Ibón" de Plan	BTT
04/08/2019	7	Aneto – Maladeta	Pic de Paderna	Senderisme



Figura 13. Imatge superior amb una fotografia realitzada des del cim del Pic de Paderna mirant en direcció al Pic de la Maladeta durant la sortida del dia 4 d'agost de 2019, en la qual es pot observar com el gel de la glacera comença a aflorar.

4.5 Informació complementaria a l'NDSI

L'índex NDSI, com s'ha comentat anteriorment, aporta un molt bon resultat en la discriminació de la neu o el gel a través de la teledetecció, però per tal d'entendre el resultat en moments puntuals també s'ha treballat amb variables meteorològiques com la precipitació i la temperatura en segon terme.

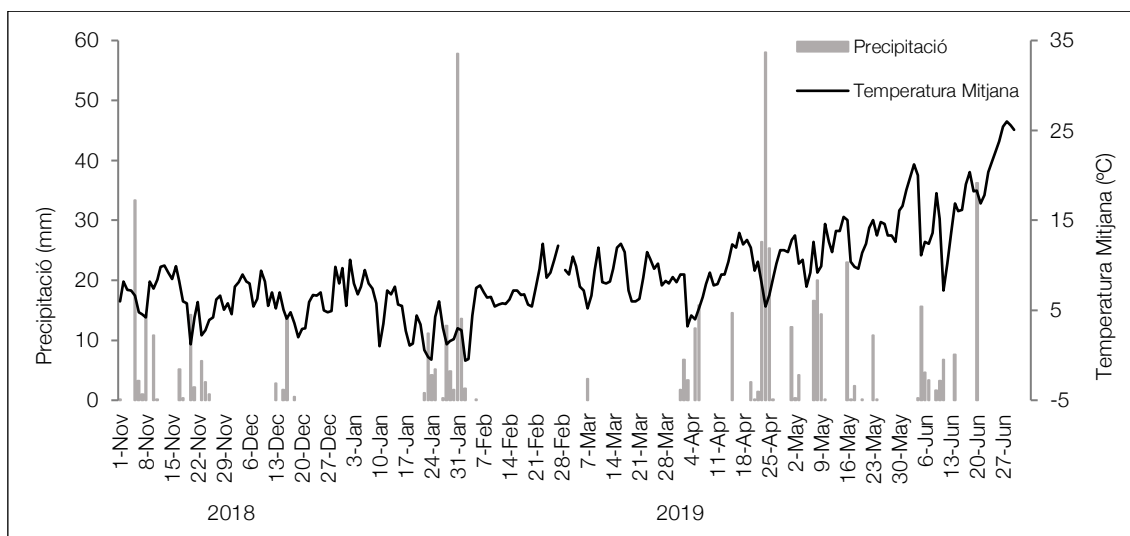
Alhora, i aprofitant la disponibilitat de models digitals del terreny per a la majoria de les zones d'estudi, també s'ha generat una cartografia amb pendents compreses entre 28 i 45 graus, i per sobre d'una altura superior als 1.600 metres.

4.5.1 Dades meteorològiques analitzades

El Pirineu en la seva part aragonesa no disposa de la densitat d'estacions meteorològiques que sí té el català, encara així, s'han descarregat dades de dues estacions clau a la zona de l'Aragó, com són Torla i Bielsa, ambdues a la província de Osca, i les estacions de Lac Redon, Boí i Espot a la part catalana, totes tres a la província de Lleida. Ara bé, cal remarcar en primer lloc que l'estació de Torla s'ha descartat finalment per culpa de que la darrera data disponible corresponia al dia 4 de maig de l'any 2016, és a dir, només s'han utilitzat dades de les estacions de Bielsa, Lac Redon, Boí i Espot.

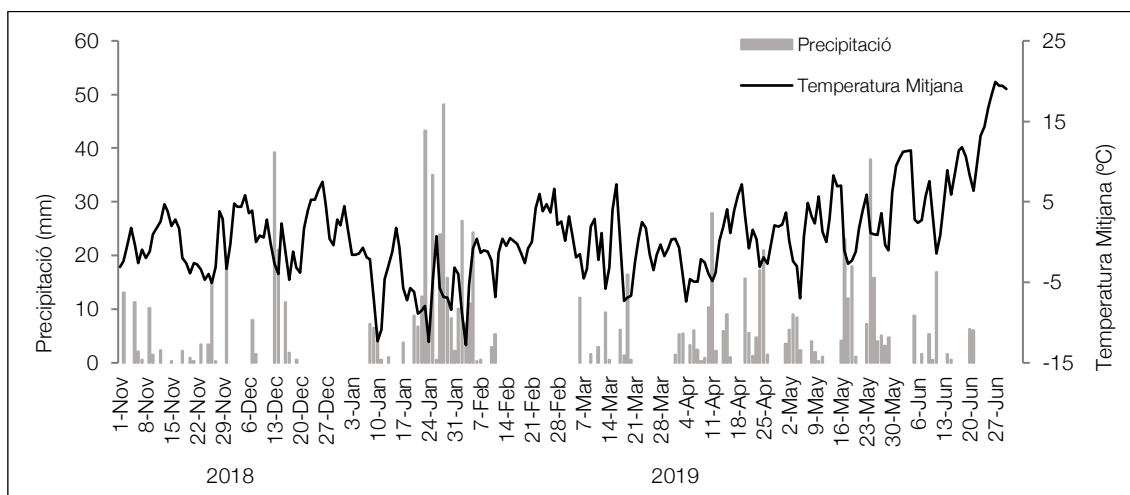
Les variables seleccionades són temperatura mitjana i precipitació de forma diària, en un període compres entre el dia 1 de novembre de 2018, al dia 30 de juny de 2019, un criteri establert seguint el model similar al que utilitza el registre del Servei d'informació de gruix de neu i valoració climàtica diària: InfoGruixNEU de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, el qual finalitza el registre de dades el 20 de juny de cada any.

Estació de Bielsa



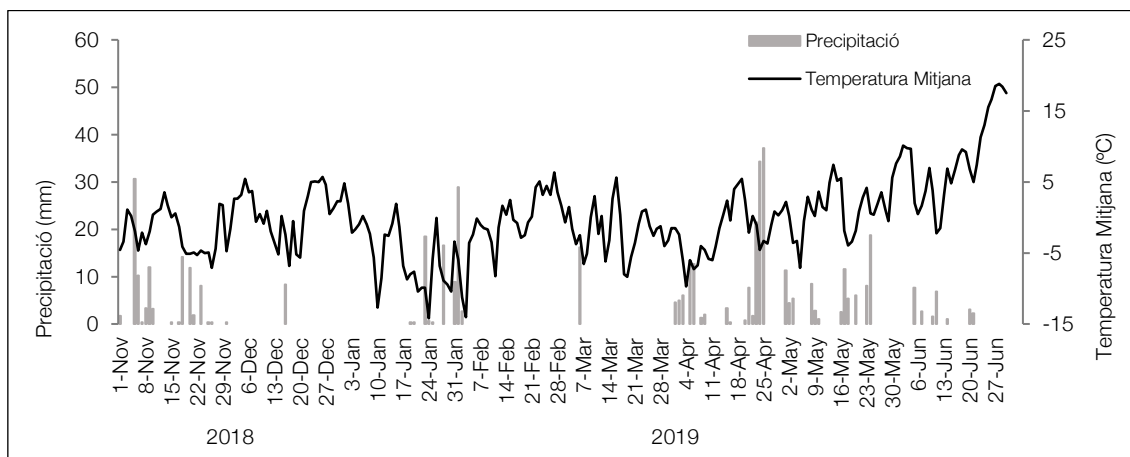
Gràfica 1. Evolució de la temperatura mitjana diària i precipitació a l'estació de Bielsa.

Estació de Lac Redon



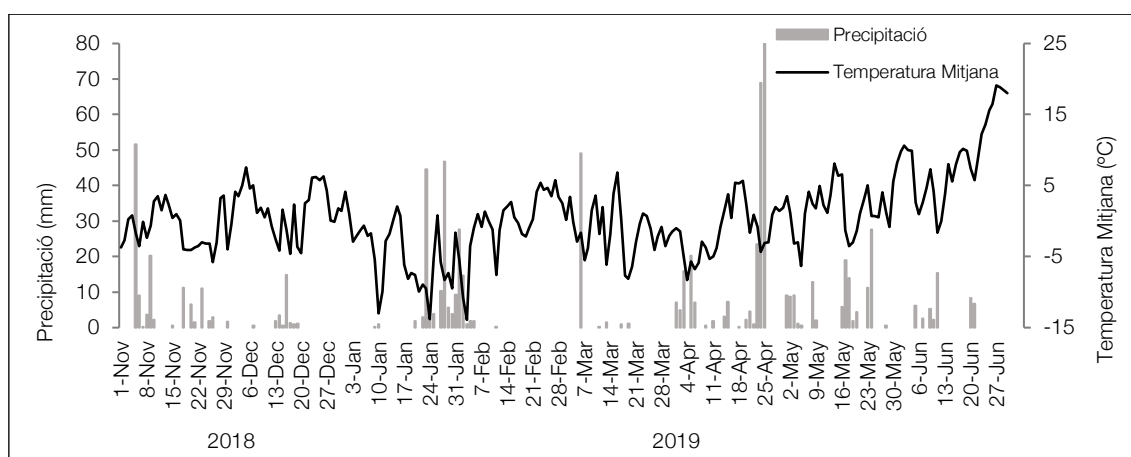
Gràfica 2. Evolució de la temperatura mitjana diària i precipitació a l'estació de Lac Redon.

Estació de Boí



Gràfica 3. Evolució de la temperatura mitjana diària i precipitació a l'estació de Boí.

Estació d'Espot



Gràfica 4. Evolució de la temperatura mitjana diària i precipitació a l'estació de d'Espot.

Un cop visualitzades les dades, es pot observar com tot i la diferència de valors en les temperatures mitjanes, la tendència al llarg del període és similar, amb les temperatures més baixes durant el mes de gener, i un altre descens marcat durant els mesos de març i abril. Les precipitacions presenten una major variabilitat, amb l'estació de Lac Redon que registra un nombre superior de dies de precipitació, però en totes, a finals de gener i la segona meitat d'abril registren dos períodes amb precipitacions significatives.

4.5.2 Informació generada a partir del model digital del terreny

El procés per poder generar la capa amb els pendents s'ha dut a terme mitjançant el següent procés.

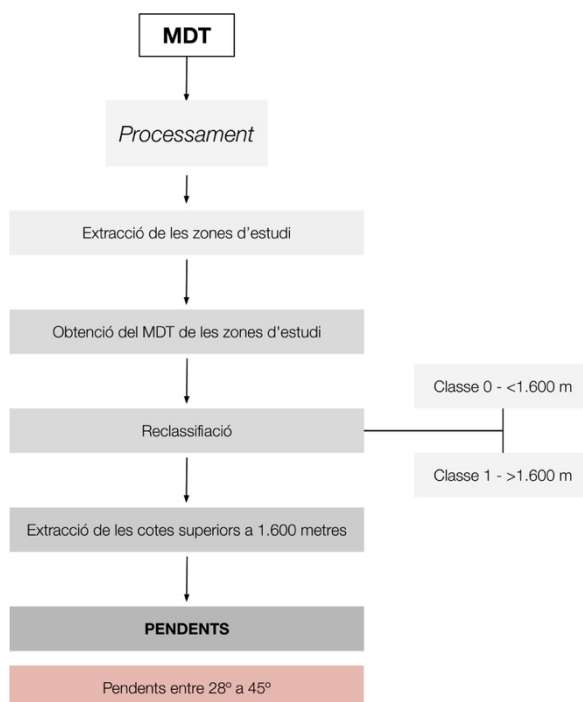


Figura 14. Representació dels passos a realitzar per poder generar el mapa de pendents.

Processat del model digital del terreny

El model digital del terreny (MDT) es va obtenir a partir del Centre Nacional d'Informació Geogràfica, amb un pas de malla de 5 metres i elaborat per la interpolació a partir de la classe de vols LIDAR del Pla Nacional de Ortofotografia Aèrea. El MDT es troba en format ASCII matriu ESRI (.asc) i amb una distribució i dimensions dels folis MTN50, fet que fa que per completar les zones d'estudis s'han utilitzat diferents fulls. Un número total de 16 de fulls que mitjançant la funció de Combinar capes ràster de QGIS s'han unit per formar un únic arxiu (Figura 15).

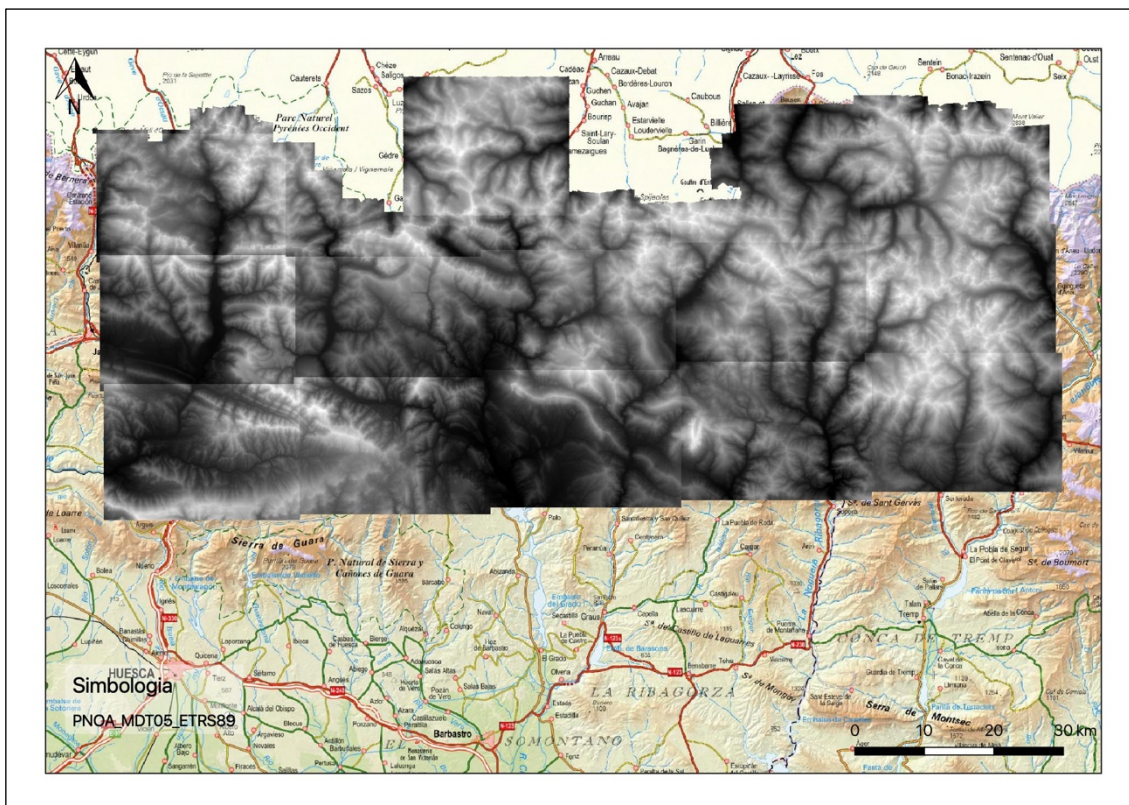
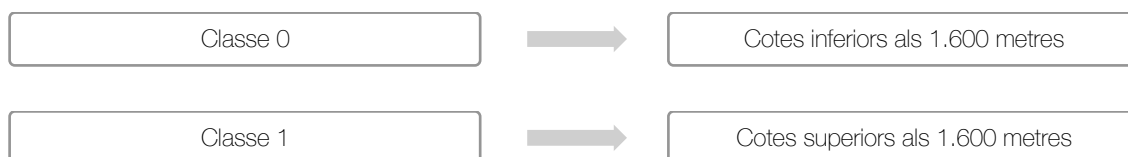


Figura 15. Imatge de la combinació dels MDT que s'han utilitzat.

A partir de la combinació de tots els fulls, s'ha dut a terme l'extracció per cadascuna de les zones d'estudi a través del software QGIS. Un cop delimitades les zones d'estudi, l'MDT de cadascuna d'aquestes s'ha Reclassificat en dues classes:



La capa generada en format ràster, s'ha convertit a format vectorial, i s'ha aprofitat el polígon de la Classe 1 per poder dur a terme l'extracció de l'MDT per sobre dels 1.600 metres (Figura 26).

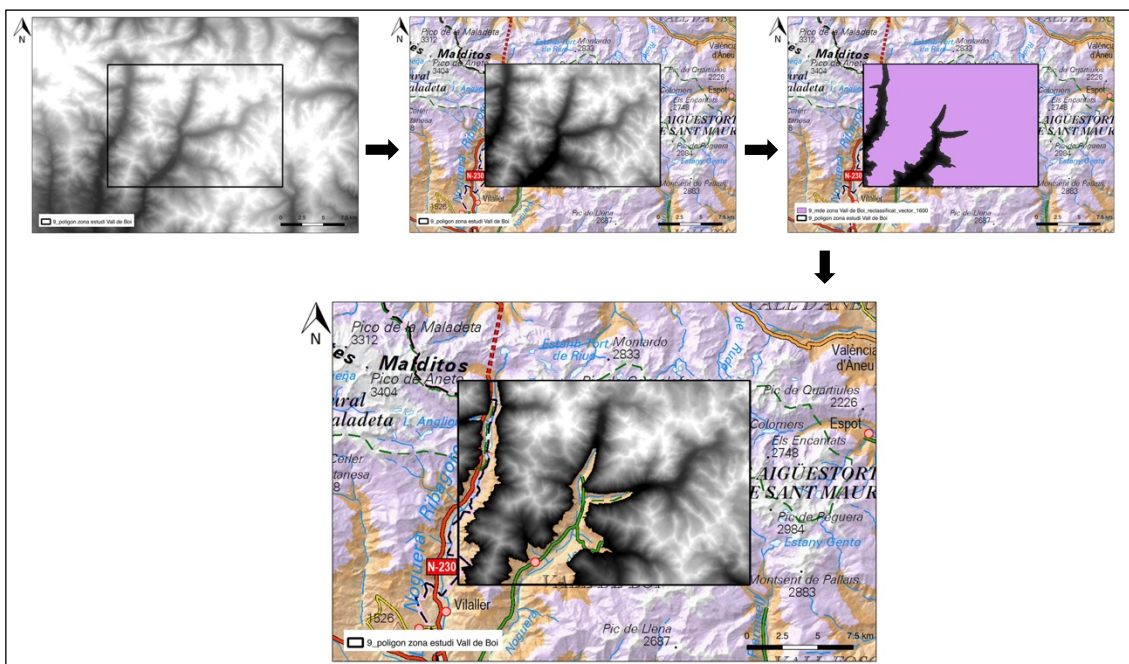


Figura 16. Imatge amb la seqüència del procés realitzat en la zona d'estudi de la Vall de Boí per arribar a assolir un MDT amb les àrees que es troben per sobre dels 1.600 metres.

El ràster generat amb el límit de la zona d'estudi i amb l'extracció de les àrees que es troben per sobre de 1.600 metres, permet crear un mapa de pendents per a cada zona amb el rang seleccionat entre 28 i 45 graus tal com es mostra a la Figura 17 per a la zona de la Vall de Boí.



Figura 17. Imatge del plànol generat a les àrees que tenen un pendent entre 28 i 45 graus.

5. Resultats i discussió

La metodologia emprada al llarg del treball ha permès obtenir una quantitat d'arxius en format ràster que posteriorment han estat analitzats a través d'una sèrie de gràfiques elaborades a partir dels resultats obtinguts després de calcular l'índex NDSI per a cada zona d'estudi i moment determinat.

Els resultats no pretenen en cap moment validar un mètode o índex, fet que aquest ja ha estat contrastat en treballs anteriors, però sí generar una cartografia de la distribució del mantell nival en unes zones determinades del Pirineu, a partir d'imatges amb una resolució i freqüència superiors a estudis anteriors (Pineda et al., 2005; Cea López et al., 2007), generant sèries temporals d'una informació que és totalment complementària a la ja existent. Endemés, és una cartografia contínua en el temps, fàcil d'entendre i que estarà disponible per qualsevol usuari i en qualsevol àmbit, d'una forma accessible a través de la seva incorporació a una plataforma digital, amb el propòsit de que aquesta sigui consultada i utilitzada. Però abans, s'exposen els resultats obtinguts fins al moment.

5.1 Evolució del mantell nival a través del valor NDSI

Les imatges ràster generades després d'utilitzar l'algoritme de l'índex NDSI en combinació de les bandes 3 i 11 proporcionen un resultat que no és únicament la cartografia, sinó que també aporten uns valors numèrics que ajuden a entendre els mapes generats.

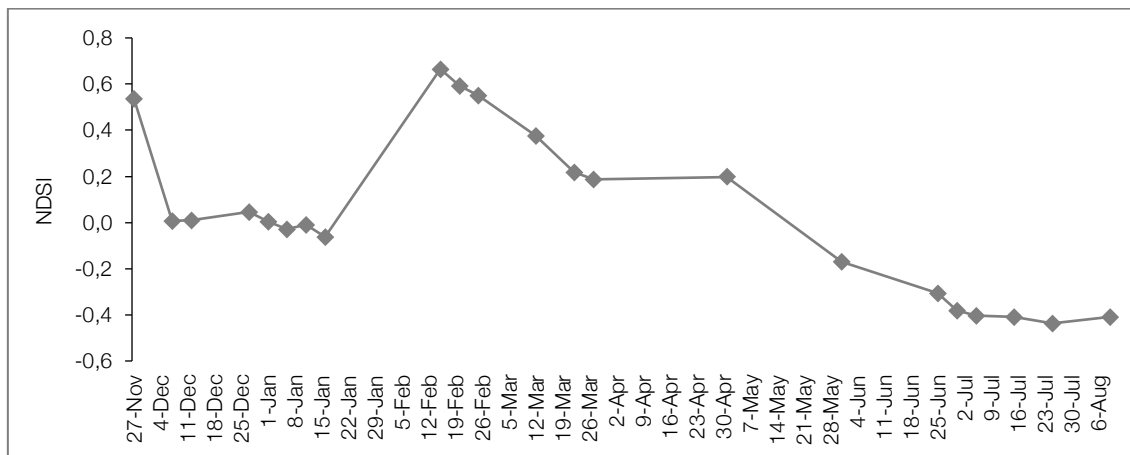
Aquest tipus d'arxius tenen la particularitat que cada píxel té un valor, un valor que expressa el resultat de l'equació de l'NDSI. Ara bé, aquestes imatges poden arribar a contenir milions de píxels, i és per això que s'utilitza el valor mitjà de cada zona, proporcionant un únic valor per cada imatge treballada.

Aquest índex, com s'ha comentat anteriorment, aporta valors entre -1 i 1, els valors negatius són superfícies sense neu, vegetació, sòl i roques, paviments artificials, etc. Els valors positius fan referència a masses d'aigua, núvols i neu o gel, i més concretament, hi ha autors com Kulkarni et al. (2002) que fins i tot identifiquen els diferents tipus de neu, i segons aquest mateix autor i els resultats observats, les làmines d'aigua poden resultar un problema perquè es poden confondre amb la neu a causa dels elevats valors que presenten (0,96 segons Kulkarni et al., 2002). Ara bé, hi ha autors com Kaplan i Advan (2017), que utilitzen la combinació de nous algoritmes per extraure aquestes masses d'aigua. Per consegüent, els píxels amb un valor inferior a 0,4 no es consideren neu o gel. Això fa, que els resultats obtinguts en dates concretes, presentin valors negatius, a causa de la presència de més píxels en la imatge que es classifiquen com a vegetació o sòl nu i roques.

Així, seguint aquest procediment s'ha generat mitjançant el software QGIS una informació estadística per cada imatge, de manera que cada zona d'estudi té 22 valors de la mitjana de l'índex NDSI, que corresponen a les 22 dates que s'han analitzat. Uns resultats representats en forma de

gràfica per tal que es pugui observar l'evolució d'aquests per cadascuna de les zones, veient les variacions de l'índex en cada moment determinat.

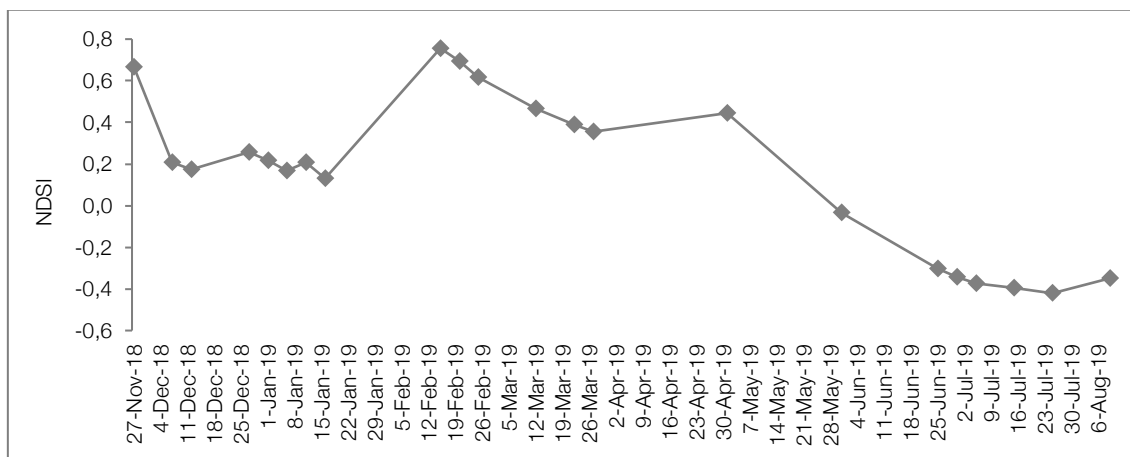
Zona d'estudi: Valle de Tena



Gràfica 5. Evolució del l'índex NDSI per a la zona del Valle de Tena durant tot el període de l'estudi.

La gràfica mostra com el valor de l'índex en aquesta zona té un pic molt marcat a mitjans del mes de febrer, i és a partir d'aquest moment que la tendència sempre és descendent. També, cal comentar que existeixen dues pujades al 27 de desembre i 11 de gener, que més endavant i relacionant aquests valors amb les variables meteorològiques s'intentaran explicar en el primer dels dies, i el segon està relacionat amb la presència de nuvolositat en àrees molt localitzades.

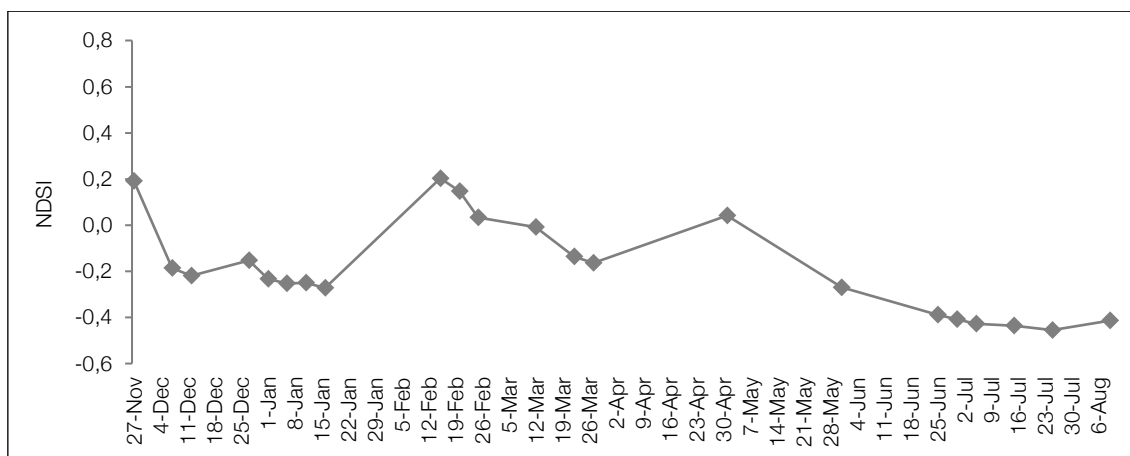
Zona d'estudi: Vignemale – Bujaruelo



Gràfica 6. Evolució del l'índex NDSI per a la zona de Vignemale – Bujaruelo durant tot el període de l'estudi.

La gràfica té una tendència molt similar a l'anterior, amb pujades i baixades, i en aquest cas amb dos pics clarament marcats com són els dies 15 de febrer i 1 de maig.

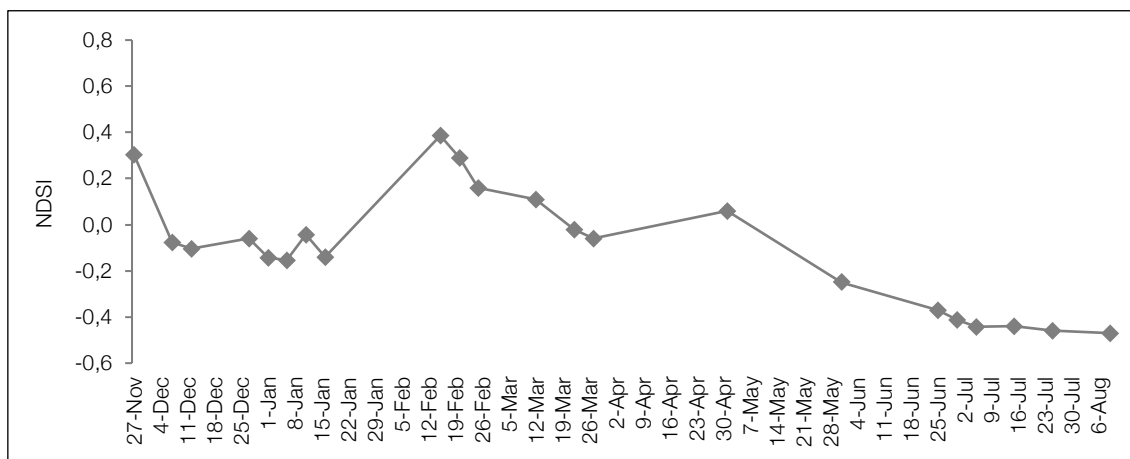
Zona d'estudi: Ordesa – Monte Perdido



Gràfica 7. Evolució del l'índex NDSI per a la zona d'Ordesa – Monte Perdido durant tot el període de l'estudi.

Les dades d'aquesta zona mostren uns valors més baixos en comparació amb els anteriors, el valor més elevat en aquest és 0,2 i a les zones anteriors existien valors d'entre 0,7 i 0,8. Això no significa que sigui una zona amb menys neu, sinó que la superfície total de la zona és superior, per tant el percentatge de neu és inferior en comparació a les anteriors. Igualment, s'observen els dos moments amb valors més elevats, coincidint amb les mateixes dates (15 de febrer i 1 de maig), però en aquest cas l'increment del dia 1 de maig és més significatiu.

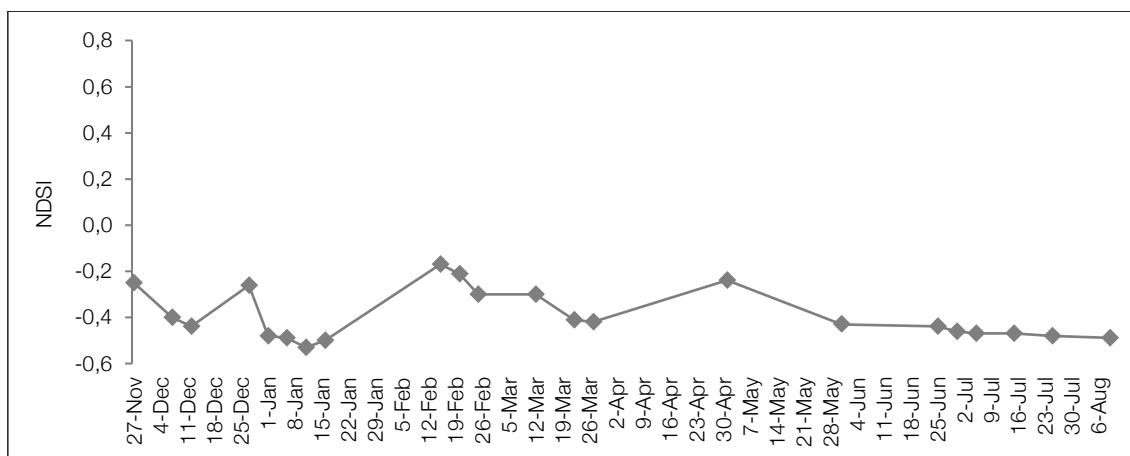
Zona d'estudi: Bielsa – Bal de Chistau



Gràfica 8. Evolució del l'índex NDSI per a la zona de Bielsa – Bal de Chistau durant tot el període de l'estudi.

L'evolució dels valors per aquesta zona continua amb una tendència molt similar a les anteriors, però en aquesta zona i gràcies a les dades de l'estació meteorològica de Bielsa es poden argumentar molt més aquestes variacions.

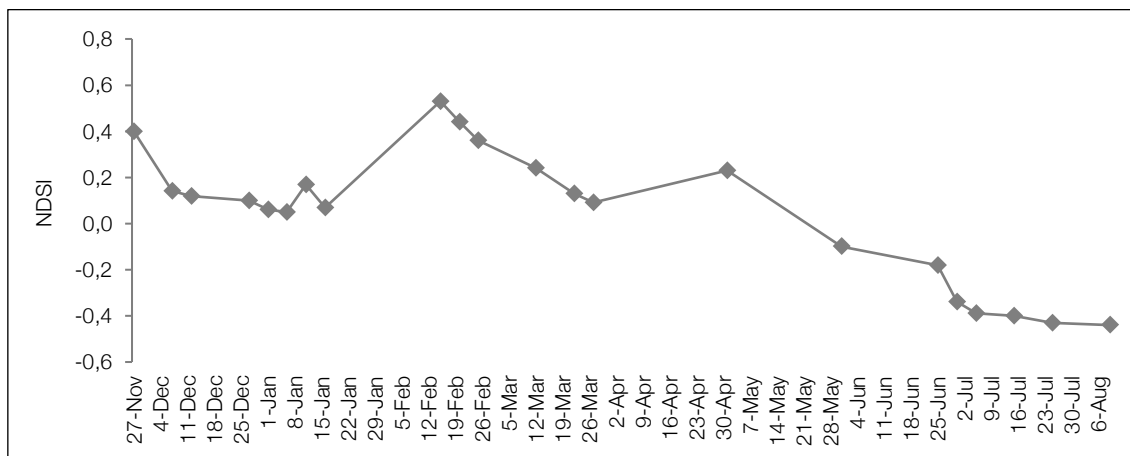
Zona d'estudi: Cotiella



Gràfica 9. Evolució del l'índex NDSI per a la zona del Cotiella durant tot el període de l'estudi.

El massís del Cotiella és la zona més al sud de les estudiades, això fa que els valors siguin molt més baixos, ja que a excepció de situacions puntuals amb temporals de llevant, la precipitació que rep sempre és inferior.

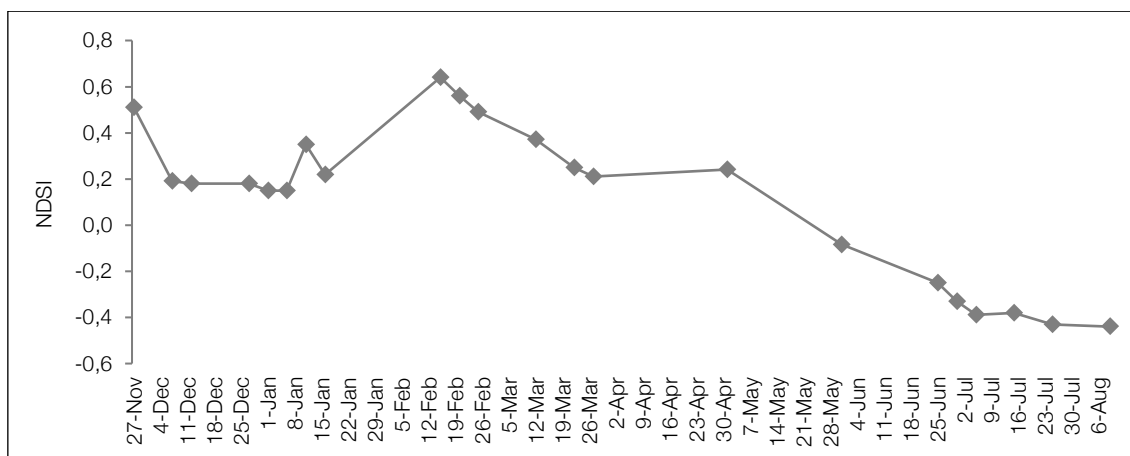
Zona d'estudi: Posets



Gràfica 10. Evolució del l'índex NDSI per a la zona del Posets durant tot el període de l'estudi.

La zona del Posets és un massís amb zones molt elevades, això fa que en aquest cas els valors tornin a ser elevats, però sempre mantenint una tendència molt similar a les anteriors zones, amb les pujades del febrer i maig.

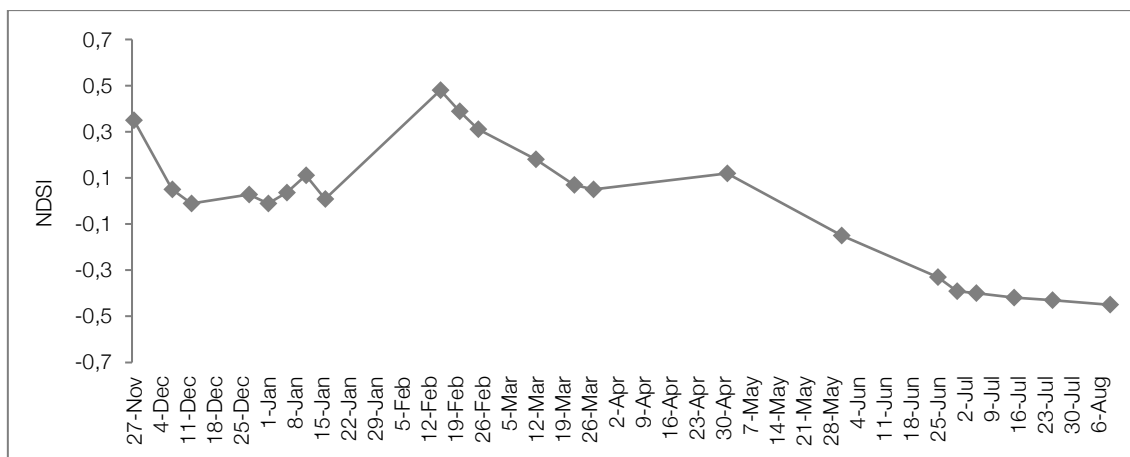
Zona d'estudi: Aneto – Maladeta



Gràfica 11. Evolució del l'índex NDSI per a la zona de l'Aneto – Maladeta durant tot el període de l'estudi.

Aquesta zona és, possiblement, l'àrea amb més possibilitats en termes d'activitats a l'hivern. És la zona amb el cim més alt del Pirineu, això fa que l'afluència d'excursionistes durant tot l'any sigui molt alta, però a més té la seva glacera, amb unes 90 hectàrees de superfície i 50 metres de profunditat en la seva part més ampla, essent la glacera més extensa de tota la serralada. Així i tot, la gràfica mostra una tendència molt similar a totes les anteriors, i com es veurà en la representació de la cartografia, l'increment que fa referència al dia 11 gener és a causa de la presència de nuvolositat.

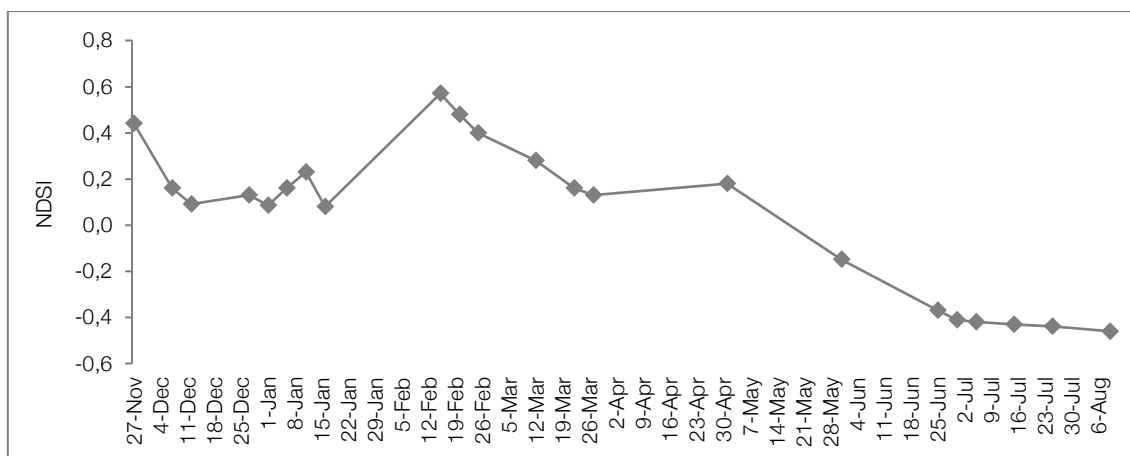
Zona d'estudi: Tuca de Mulleres – Besiberri



Gràfica 12. Evolució del l'índex NDSI per a la zona de la Tuca de Mulleres - Besiberri durant tot el període de l'estudi.

Una zona molt propera a l'anterior, i amb una tendència molt similar i que torna a mostrar com el dia 11 de gener hi ha un increment que està directament relacionat amb la presència de núvols que alteren el valor.

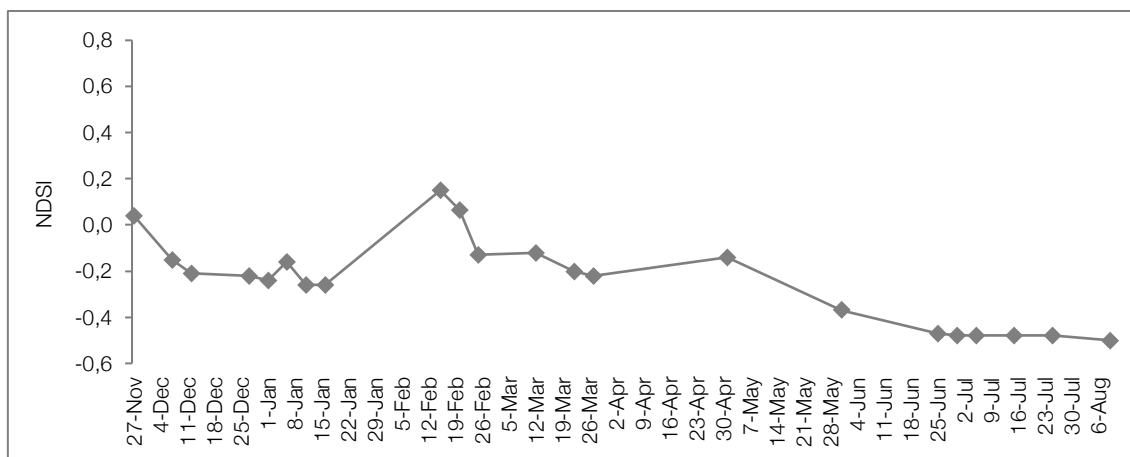
Zona d'estudi: Vall de Boí



Gràfica 13. Evolució del l'índex NDSI per a la zona de la Vall de Boí durant tot el període de l'estudi.

Aquesta zona en concret, és molt propera a l'anterior, amb una localització més al sud, però aquest fet no ha interferit en la distribució del mantell nival si es compara amb la zona del Besiberri, fet que la tendència és pràcticament paral·lela amb la mateixa situació de nuvolositat el dia 11 de gener.

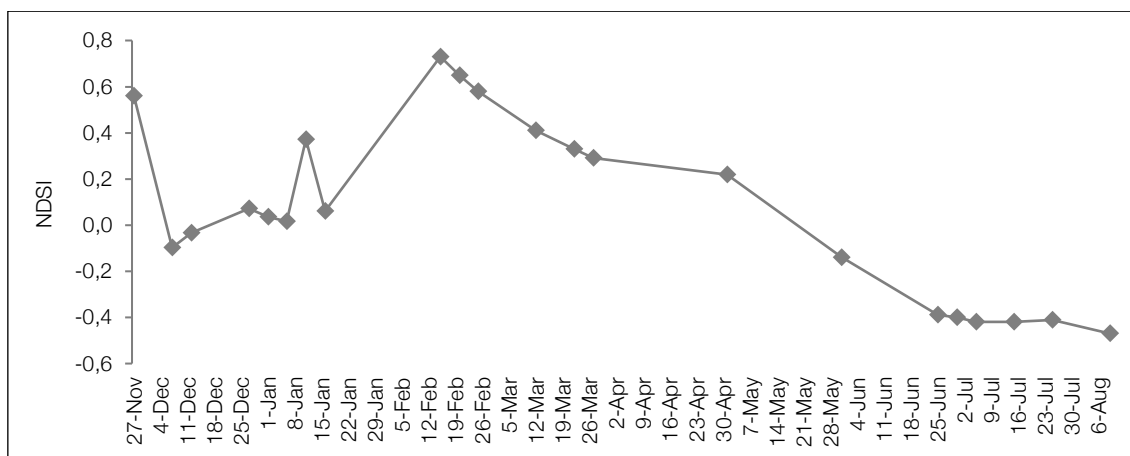
Zona d'estudi: Vall Fosca



Gràfica 14. Evolució del l'índex NDSI per a la zona de la Vall Fosca durant tot el període de l'estudi.

La Vall Fosca és la zona que es troba més a l'extrem oriental de l'àrea d'estudi, encara així, la tendència és molt similar a les anteriors, amb dos moments d'increment del valor causades per nevades, mentre que el dia 11 de gener es produeix una pujada a causa de la presència d'una capa molt feble de nuvolositat.

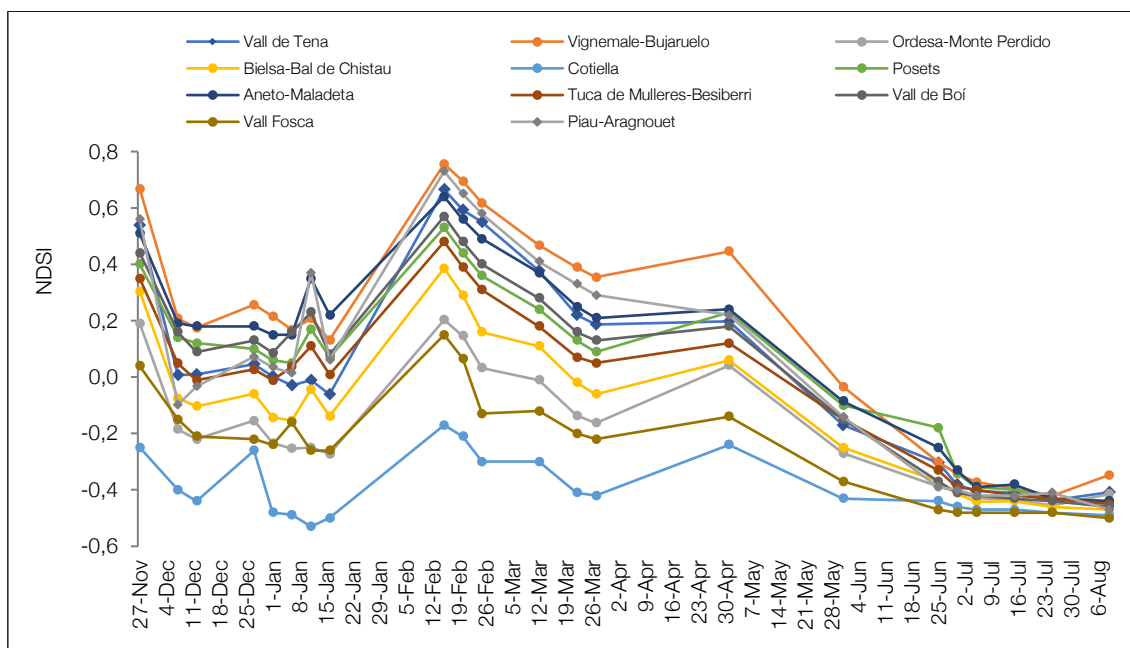
Zona d'estudi: Piau – Aragnouet



Gràfica 15. Evolució del l'índex NDSI per a la zona de la Piau-Aragnouet durant tot el període de l'estudi.

Aquesta zona, com tot el vessant francès del Pirineu té una clara influència atlàntica, cosa que fa que sigui unes de les zones amb més dificultat per trobar imatges sense la presència de nuvolositat. Ara bé, considerant les mateixes dates i imatges que en zones anteriors, sí que s'observa una tendència similar a les zones anteriors, excepte en el dia 11 de gener, que s'observa una clara pujada per culpa de l'existència de núvols en les imatges. Alhora, en el valor corresponent al dia 1 de maig, a diferència de les zones anteriors, no s'aprecia una pujada respecte del valor anterior, sinó que aquest continua en progressió descendent, degut especialment a la situació meteorològica en aquell moment, que va fer que el vessant nord del Pirineu rebés menys precipitació.

Finalment, després d'analitzar les zones de forma separada, aquestes s'han unificat en una mateixa figura per tal contrastar l'evolució en conjunt a la Gràfica 16.



Gràfica 16. Evolució del l'índex NDSI per a cadascuna de les zones analitzades.

La superposició dels valors permet veure com hi ha una tendència general que es manté en totes les zones, gràcies als episodis de precipitació que hi ha hagut durant tot el període. Ara bé, hi ha zones que en moments concrets, presenten valors que surten d'aquesta tendència, com ara el dia 12 de desembre, les zones del Valle de Tena, Tuca de Mulleres – Besiberri i de Piau – Aragnouet, mostren un increment, a causa de les precipitacions que van tenir lloc el dia 7 de desembre a el vessant nord de la serralada, unes precipitacions que van començar a les 21.00 hores i que no resten reflectides en la imatge d'aquest dia, però si posteriorment.

Un altre moment és el dia 27 de desembre, en aquest cas les zones de Piau – Aragnouet i Vall Fosca presenten un decrement dels valors, a diferència del cas anterior, és per la presència irregular de nuvolositat en diferents zones, especialment la presència de núvols prims en zones molt localitzades que produeixen una reducció del valor de l'índex a les zones que són presents.

El valor associat al dia 6 de gener, mostra com les zones de la Vall de Boí, Tuca de Mulleres – Besiberri i Vall Fosca tenen un increment, aquest increment tornar a ser a causa de la presència de núvols que alteren el valor de l'índex en aquestes zones.

Una situació similar succeeix el dia 11 de gener, justament en la línia divisòria de la serralada es forma una nuvolositat que altera el valor de l'índex en la majoria de les zones, excepte en aquelles més al sud com Cotiella i Vall Fosca, on aquests núvols no són presents i per tant el valor no es veu afectat.

La imatge de Sentinel-2 del dia 12 de març està afectada per una gran zona de nuvolositat que afecta les zones situades en la part més occidental de l'àrea d'estudi (Figura 18), això fa que aquestes presentin valors més elevats enfront de zones més orientals com Cotiella o Vall de Boí, que no registren aquesta pujada.

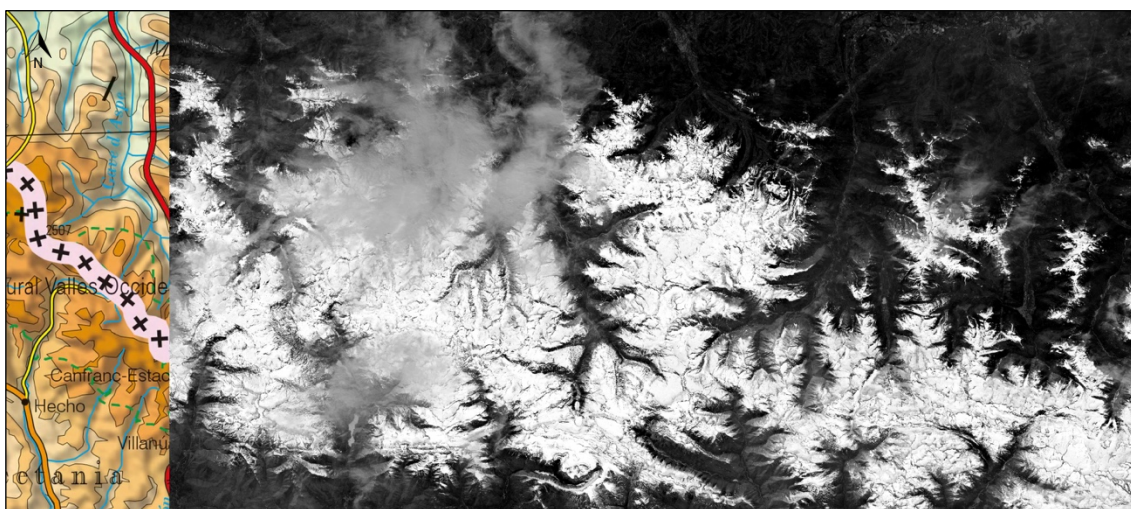
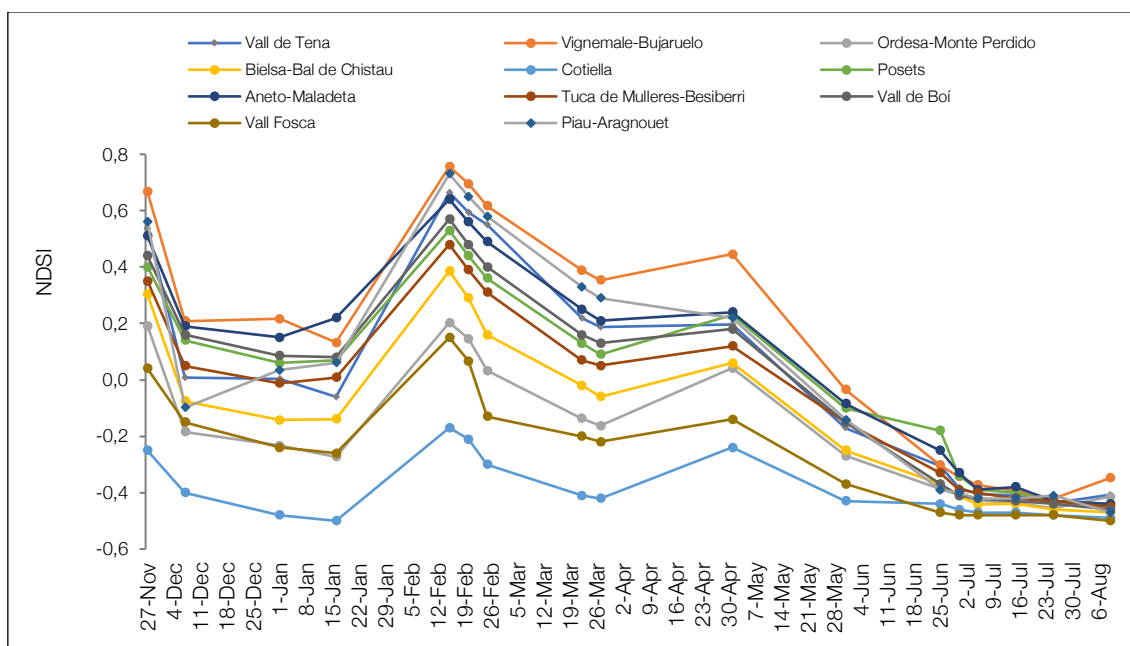


Figura 18. Imatge en la banda gris de l'índex NDSI del dia 12 de març de 2019, en la qual s'observa la zona més occidental de l'àrea d'estudi afectada per núvols.

A partir d'aquests resultats cal esmentar i remarcar la importància en la selecció de la font d'informació inicial. La nuvolositat, per poca que sigui, té un efecte molt important sobre el resultat

final, per aquest motiu i després d'analitzar els valors de les imatges s'han descartat una sèrie de dates per tal de seleccionar aquells valors que es troben sense cap mena de contaminació per la possible presència de núvols, un resultat que es recull en la següent gràfica (Gràfica 17).



Gràfica 17. Evolució del l'índex NDSI per a cadascuna de les zones analitzades amb la modificació de les dates descartades per presència de nuvolositat.

Les dates descartades són un total de cinc, concretament el 12 i 27 de desembre, el 6 i 11 de gener, i el 12 de març. A partir de suprimir aquestes dates es pot apreciar com pràcticament no hi ha cap encreuament entre línies, a excepció de moments i zones puntuals que a causa de la seva situació geogràfica com pot ser Piau – Aragnouet presenten un comportament diferent en certes dates com ara el dia 1 de gener amb un increment respecte dels altres, i pel contrari, un decrement en el dia 1 de maig. Si ve en estudis anteriors s'argumenta que l'índex NDSI permet diferenciar la neu d'altres elements, cal tenir en compte que la presència de nuvolositat en segons quines situacions, té un efecte directe sobre el resultat final.

5.2 Situació meteorològica vers l'evolució de l'NDSI

La variació del mantell nival és prou evident a través de les imatges generades, però la relació d'aquestes amb les dades de precipitació de les estacions disponibles fa encara més visible aquesta evolució.

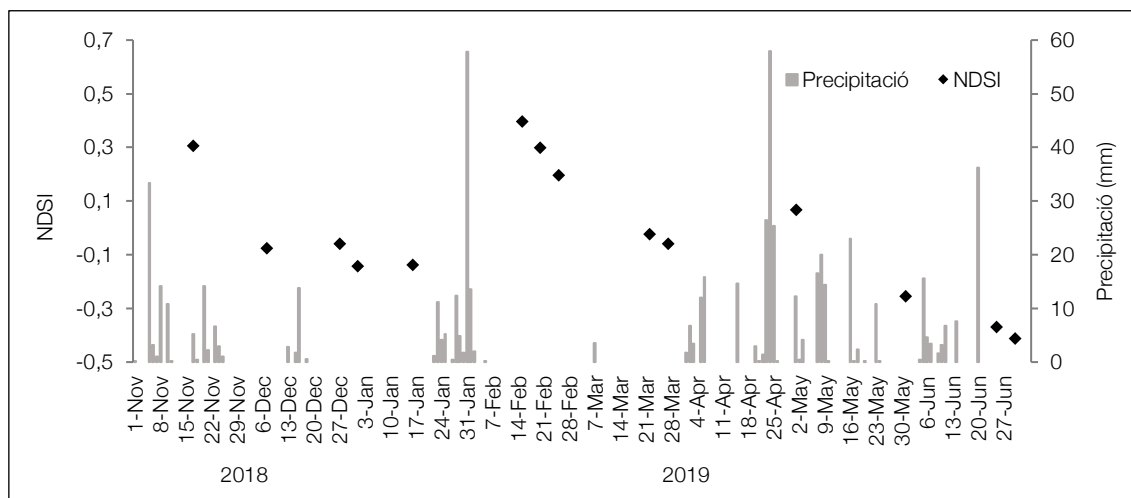
Com s'ha explicat en anteriors apartats, les dades de precipitació disponibles no recullen tota l'àrea d'estudi, a més de tractar-se en el cas de Bielsa, d'una estació situada en el mateix nucli urbà. Encara així aporten una informació important que ajuda a entendre la situació meteorològica al llarg del període d'estudi en unes zones concretes que es recullen a la Taula 5.

Taula 5. Resum de les estacions seleccionades i la zona d'estudi amb la qual s'ha relacionat.

Estació Meteorològica	Zona d'estudi
Bielsa	Bielsa – Bal de Chistau
Lac Redon	Aneto – Maladeta
Bof	Vall de Boí
Espot	Vall Fosca

Les dades meteorològiques de precipitació comencen en el dia 1 de novembre de 2018 i finalitzen en el dia 30 de juny de 2019 com s'ha comentat en l'apartat 4.5.1, per aquest motiu s'analitzen els valors de l'índex compresos entre aquestes dates.

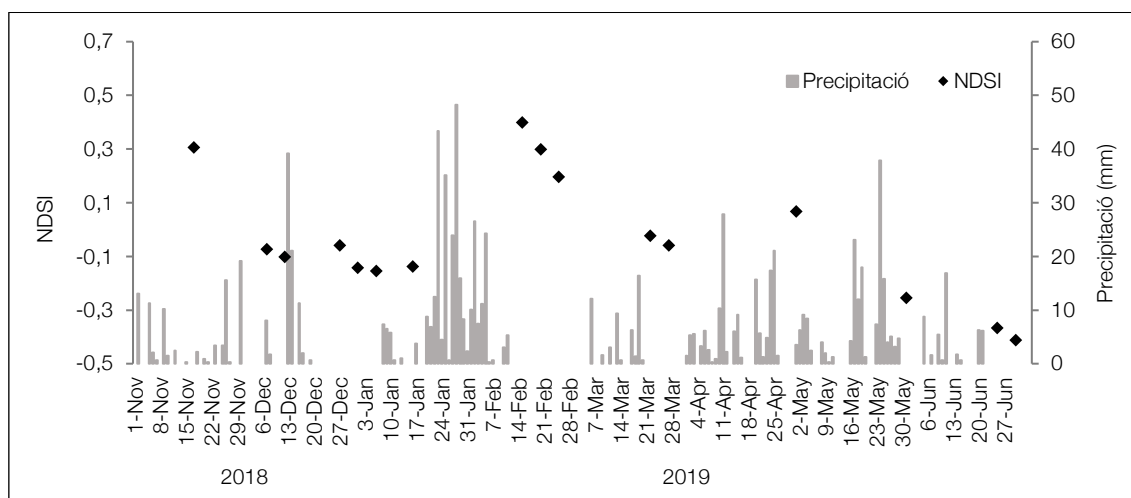
Estació de Bielsa i zona de Bielsa – Bal de Chistau



Gràfica 18. Dades de precipitació diària acumulada en l'estació de Bielsa i el valor de l'índex NDSI en cada moment a la zona de Bielsa – Bal de Chistau.

Els punts que fan referència al valor de l'índex en cada data determinada mostren com després de cada episodi de precipitació aquest té un increment, especialment quan les quantitats d'aquestes són elevades.

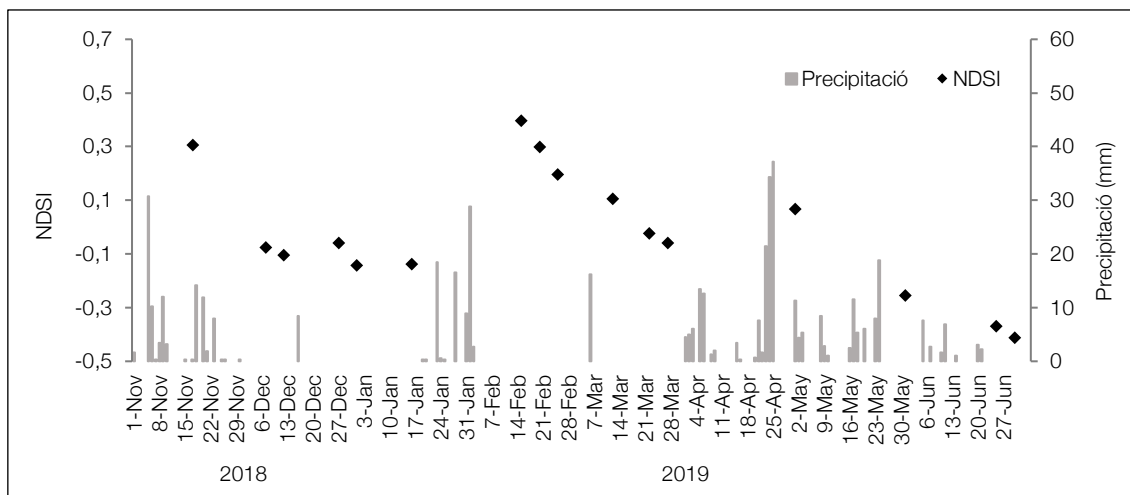
Estació de Lac Redon i zona d'Aneto – Maladeta



Gràfica 19. Dades de precipitació diària acumulada en l'estació de Lac Redon i el valor de l'índex NDSI en cada moment a la zona d'Aneto – Maladeta.

En aquest cas, les precipitacions estan més repartides al llarg del període, però després de cada episodi de precipitació, l'índex incrementa el seu valor, excepte a finals del mes de maig i juny atès que les precipitacions són en forma líquida.

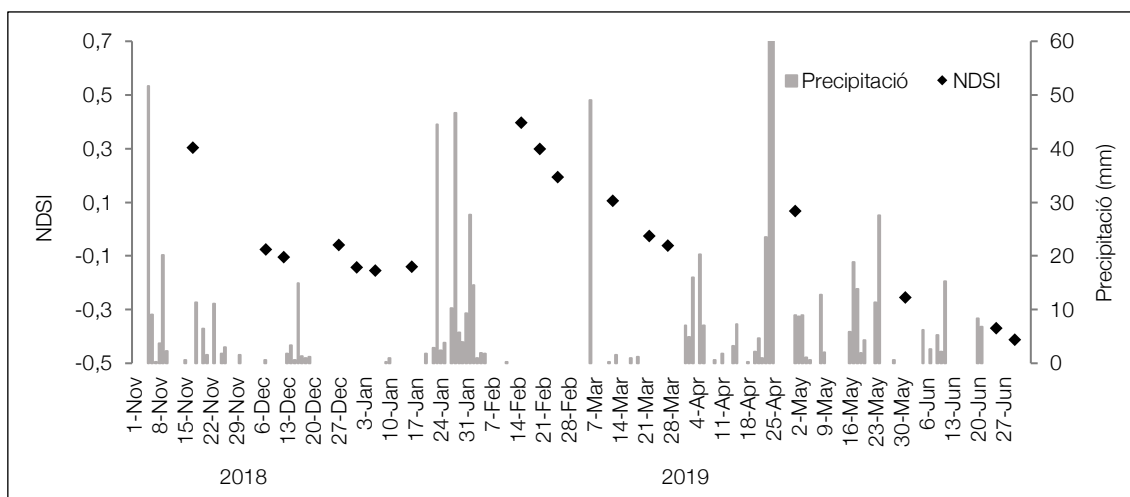
Estació de Boí i zona de la Vall de Boí



Gràfica 20. Dades de precipitació diària acumulada en l'estació de Boí i el valor de l'índex NDSI en cada moment a la zona de la Vall de Boí.

Les precipitacions en l'estació de Boí són més irregulars, amb un mes de desembre i mig gener amb molt poca precipitació, però el valor de l'índex sí que respon amb un increment després de cada episodi de precipitacions i una forta baixada quan aquestes no es produeixen a partir del mes de febrer.

Estació d'Espot i zona de la Vall Fosca



Gràfica 21. Dades de precipitació diària acumulada en l'estació d'Espot i el valor de l'índex NDSI en cada moment a la zona de la Vall Fosca.

La zona de la Vall Fosca és la que es troba més al sud, tocant a la zona del Cotiella, la gràfica però, mostra com després de les precipitacions el valor de l'índex augmenta, excepte el dia 12 de març. En aquest cas si es miren les temperatures mitjanes de dies anteriors, aquestes són molt

elevades, per sobre de 4-5 graus, això va provocar que molta neu es desfés entre el 20 de març i el dia 6 de març, dia que en el que va tornar a nevar.

Després d'analitzar les dades de precipitació i superposar-les amb els valors de l'índex en cadascuna de les zones, l'NDSI té una resposta després de cada precipitació, ara bé, aquesta és en termes de distribució de neu, més o menys superfície de neu, però de moment és molt difícil identificar la qualitat d'aquesta neu. L'evolució temporal permet veure l'augment o no de l'índex, fet que amb una bona selecció prèvia de les imatges, permet identificar els moments en els quals s'ha produït una nevada. A més, com hi ha disponible informació de dates anteriors, l'usuari pot identificar si aquesta precipitació ha caigut sobre superfícies amb presència o no de neu anterior, un aspecte clau en termes de seguretat a la muntanya.

5.3 Distribució del mantell nival

La visualització de la distribució del mantell nival al llarg de tot un període és el principal objectiu d'aquest treball. Abans, però, és necessari entendre la informació que aporten les capes ràster que es generen durant el procés per poder elaborar la cartografia amb l'evolució del mantell.

Per fer-ho, com ja s'ha mencionat anteriorment, la proposta és que aquesta cartografia estigui disponible en una plataforma digital, amb els mapes generats en cada zona i data. Cal comentar que són 11 zones i 22 dates, amb el que es generen 242 imatges. Per aquest motiu, en aquest document es presenta una d'aquestes zones a tall d'exemple, però remarcar que la resta de zones estaran disponibles de forma digital.

Per aquest fet, comentar que els mapes que es presenten en format de paper són de la zona de l'Aneto – Maladeta. Es tracta de la zona en la qual s'han realitzat més sortides, però a més també hi és present el cim més alt del Pirineu, la glacera més gran de la serralada, i es tracta d'una zona com s'ha comentat anteriorment, amb molta activitat hivernal.

Ahora, cal explicar que la capa ràster generada s'ha superposat sobre un mapa topogràfic i no sobre una ortofoto, concretament el Mapa Topogràfic Nacional a escala 1:25.000. El motiu és que aquest tipus de mapa aporta una gran quantitat d'informació, com ara topònims i corbes de nivell que ajuden a entendre l'orografia del terreny, així com camins o senders. Una informació molt útil si es té en compte l'usuari final d'aquest tipus de cartografia.

Cartografia de la zona Aneto – Maldeta

Aquesta zona té una superfície de 40.589 hectàrees, i per representar-ho de forma que sigui visible tota l'extensió s'ha seleccionat una escala d'1:105.000.

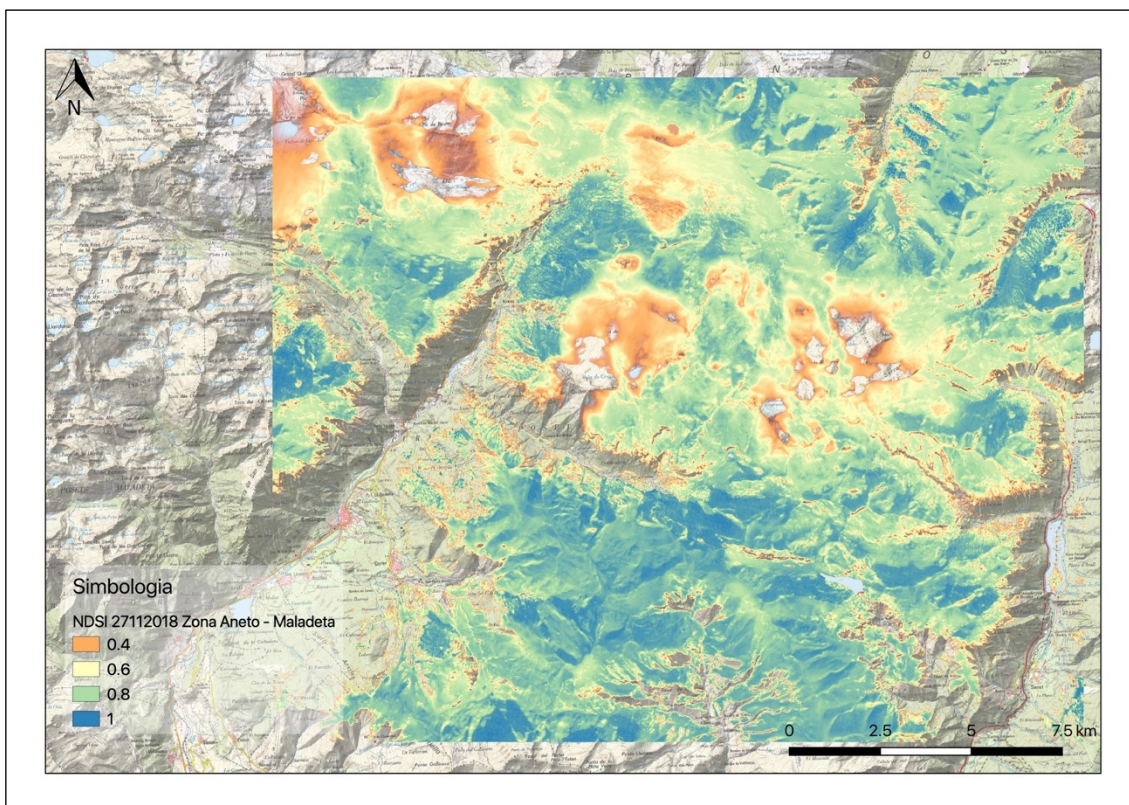


Figura 19. Representació de la zona de l'Aneto - Maladeta del dia 27 de novembre de 2018.

En aquest cas, la Figura 19 mostra com hi ha una àrea de la imatge a la part superior que es veu afectada per una alteració, i com modifica el resultat final.

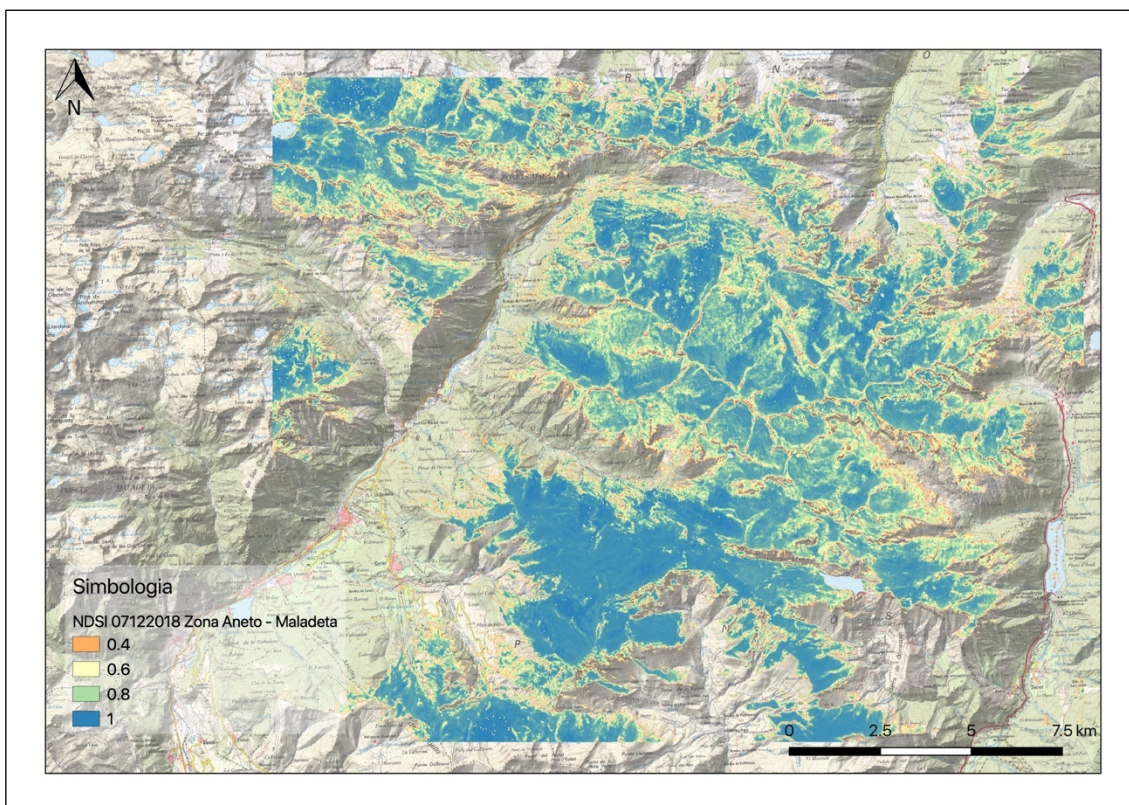


Figura 20. Representació de la zona l'Aneto - Maladeta del dia 7 de desembre de 2018.

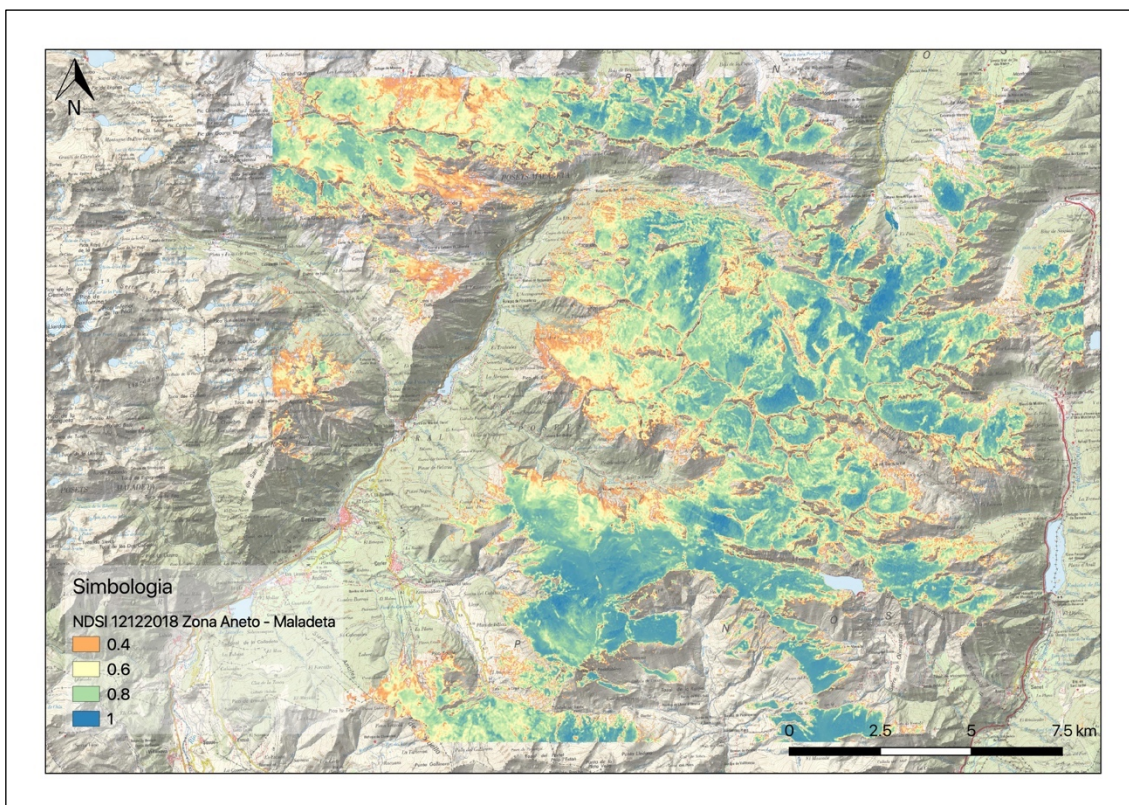


Figura 21. Representació de la zona l'Aneto - Maladeta del dia 12 de desembre de 2018.

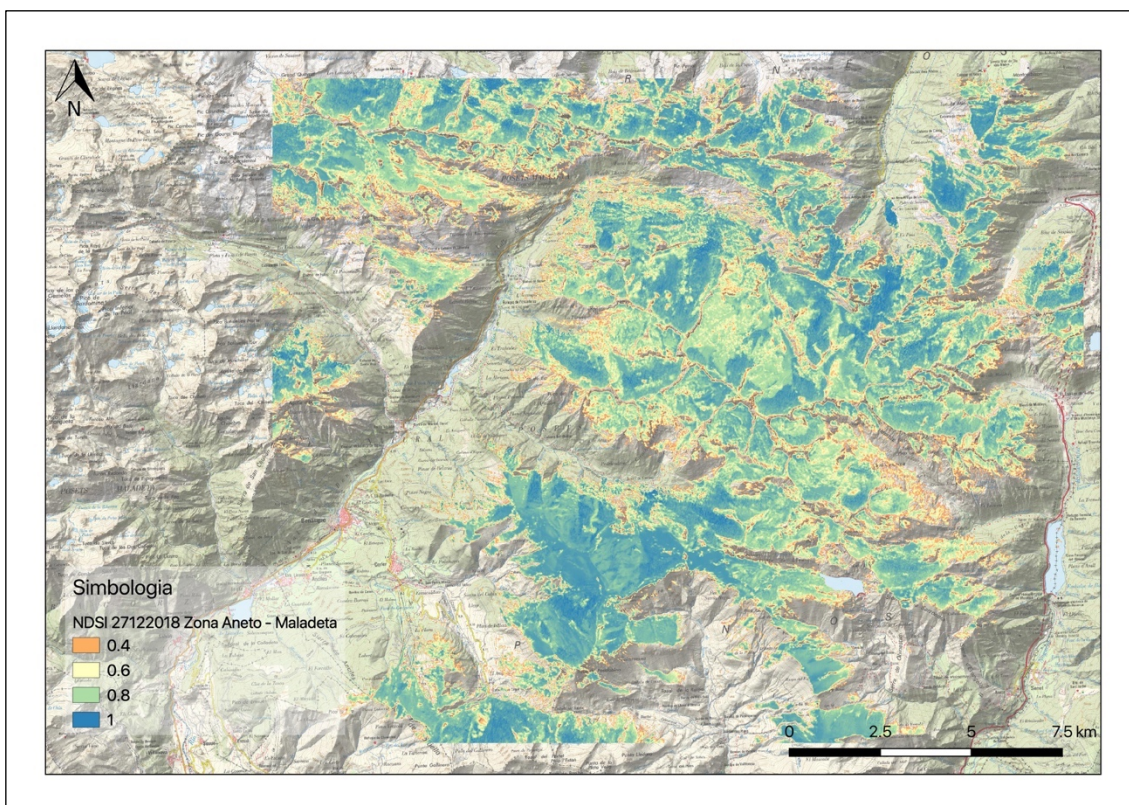


Figura 22. Representació de la zona l'Aneto - Maladeta del dia 27 de desembre de 2018.

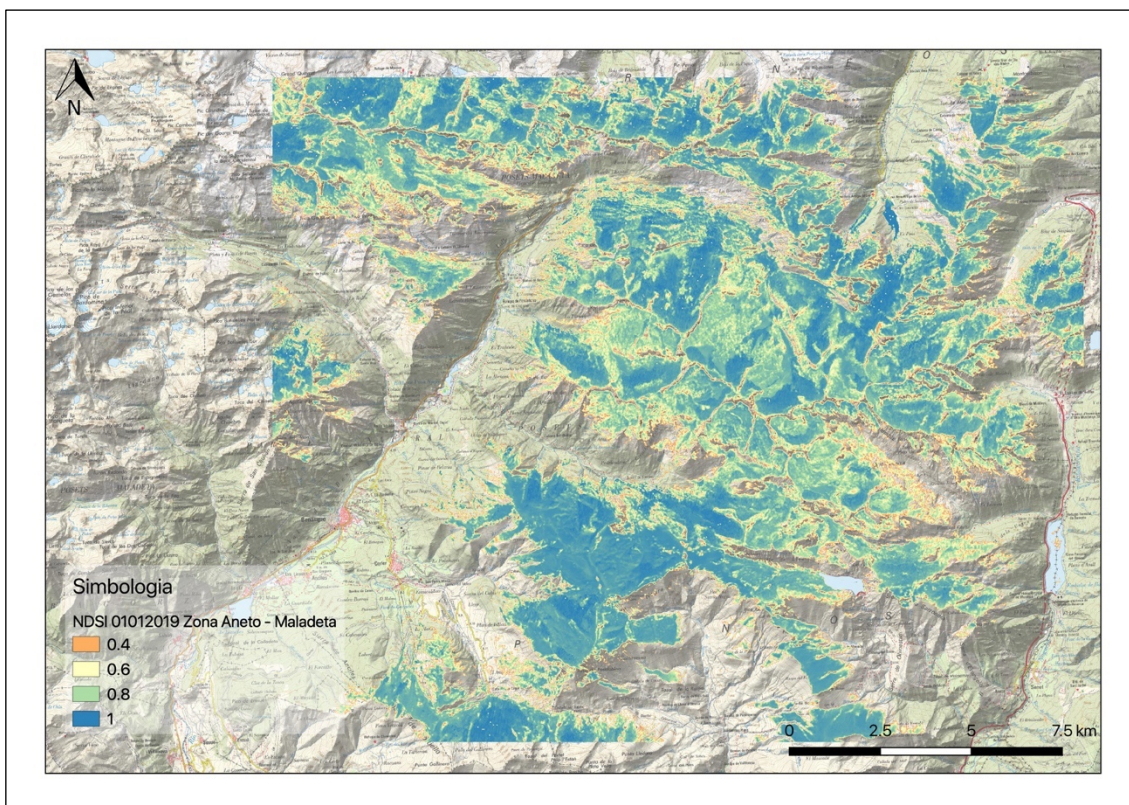


Figura 23. Representació de la zona l'Aneto – Maladeta del dia 1 de gener de 2019.

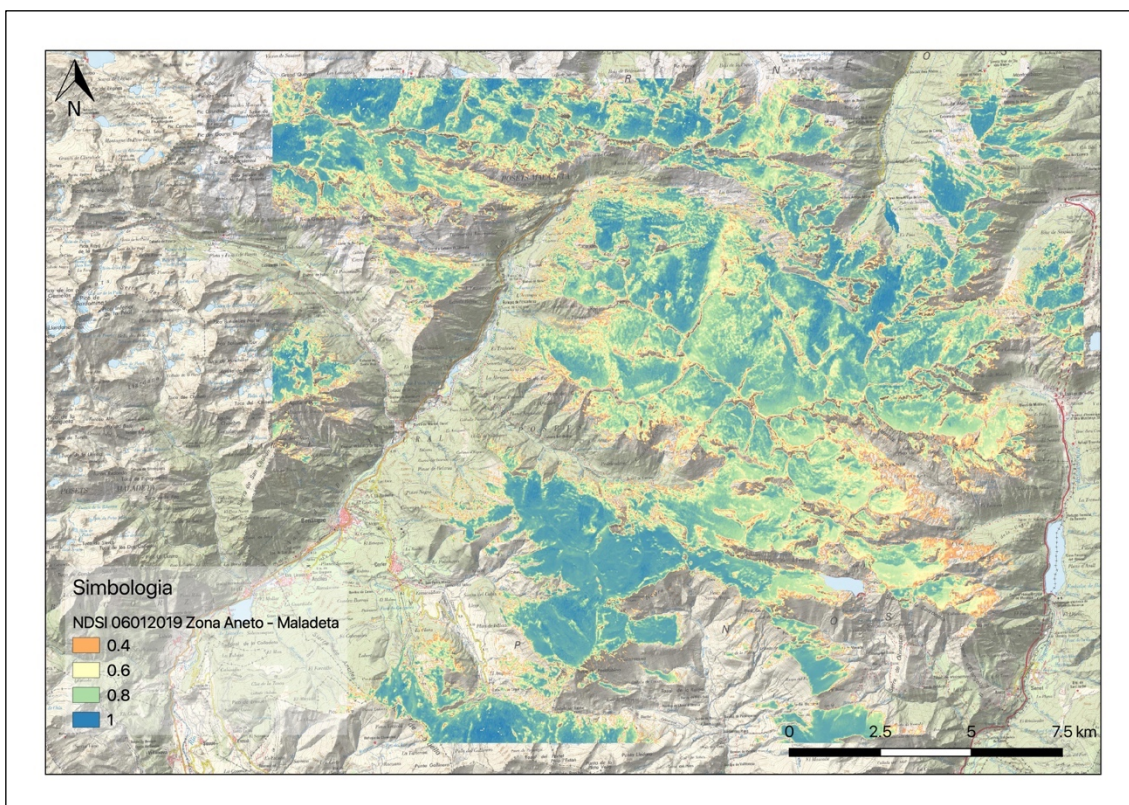


Figura 24. Representació de la zona l'Aneto – Maladeta del dia 6 de gener de 2019.

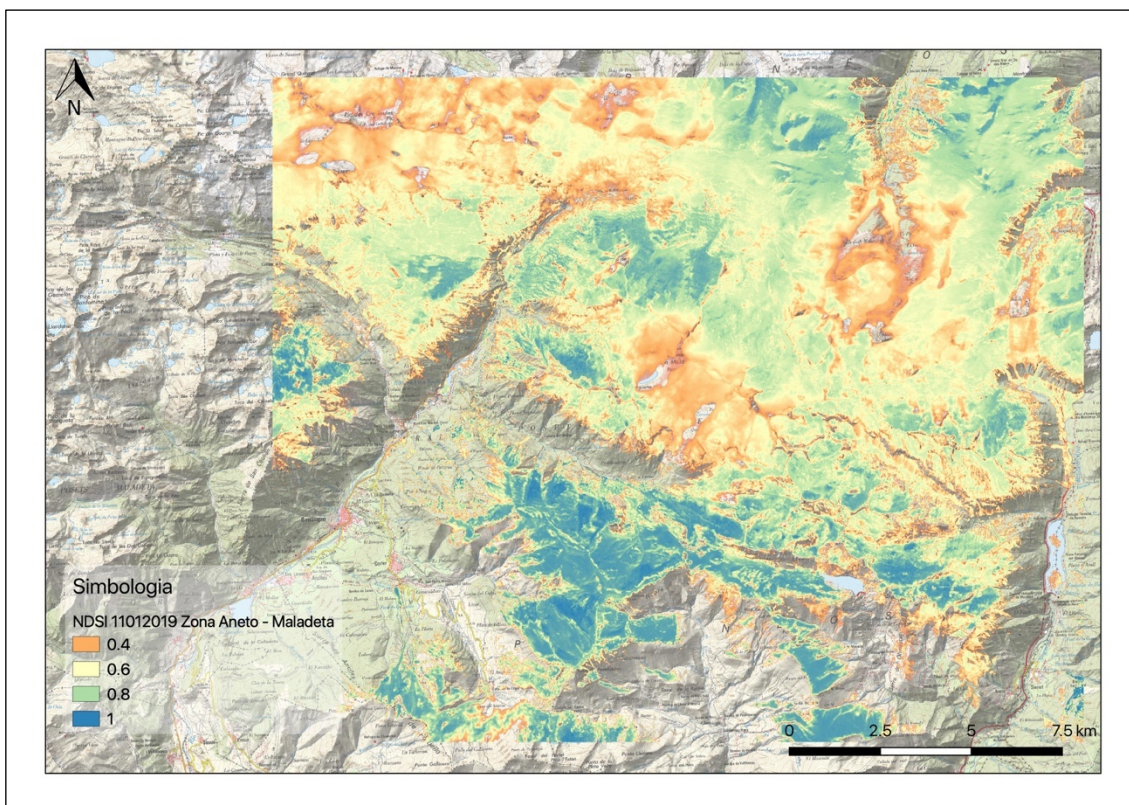


Figura 25. Representació de la zona l'Aneto - Maladeta del dia 11 de gener de 2019.

En aquesta imatge (Figura 25) és present el problema de la nuvolositat, que afecta el resultat final de la capa.

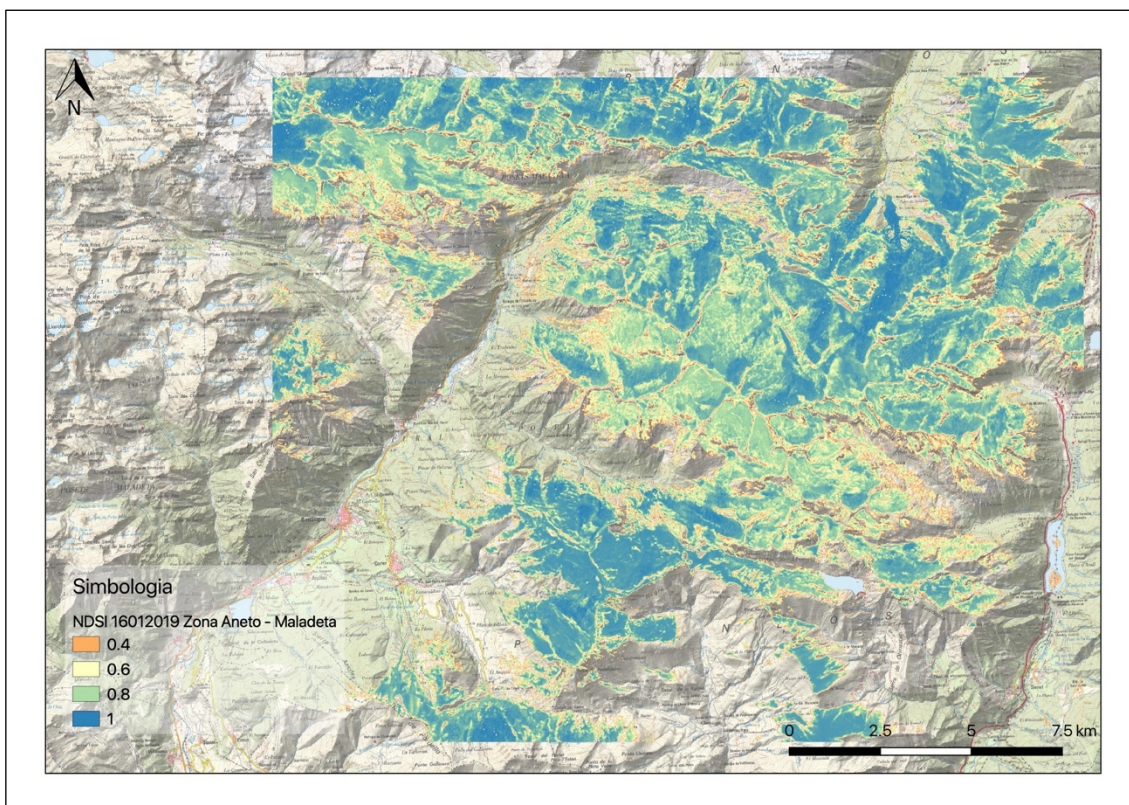


Figura 26. Representació de la zona l'Aneto - Maladeta del dia 16 de gener de 2019.

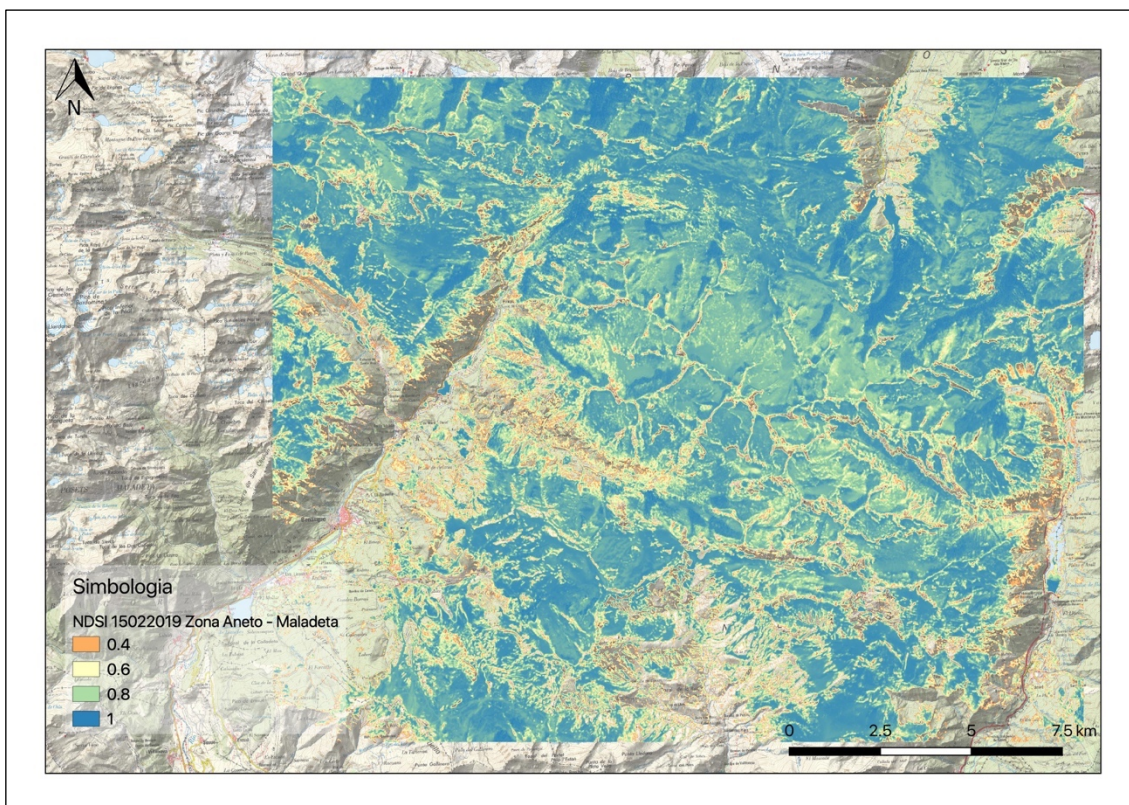


Figura 27. Representació de la zona l'Aneto – Maladeta del dia 15 de febrer de 2019.

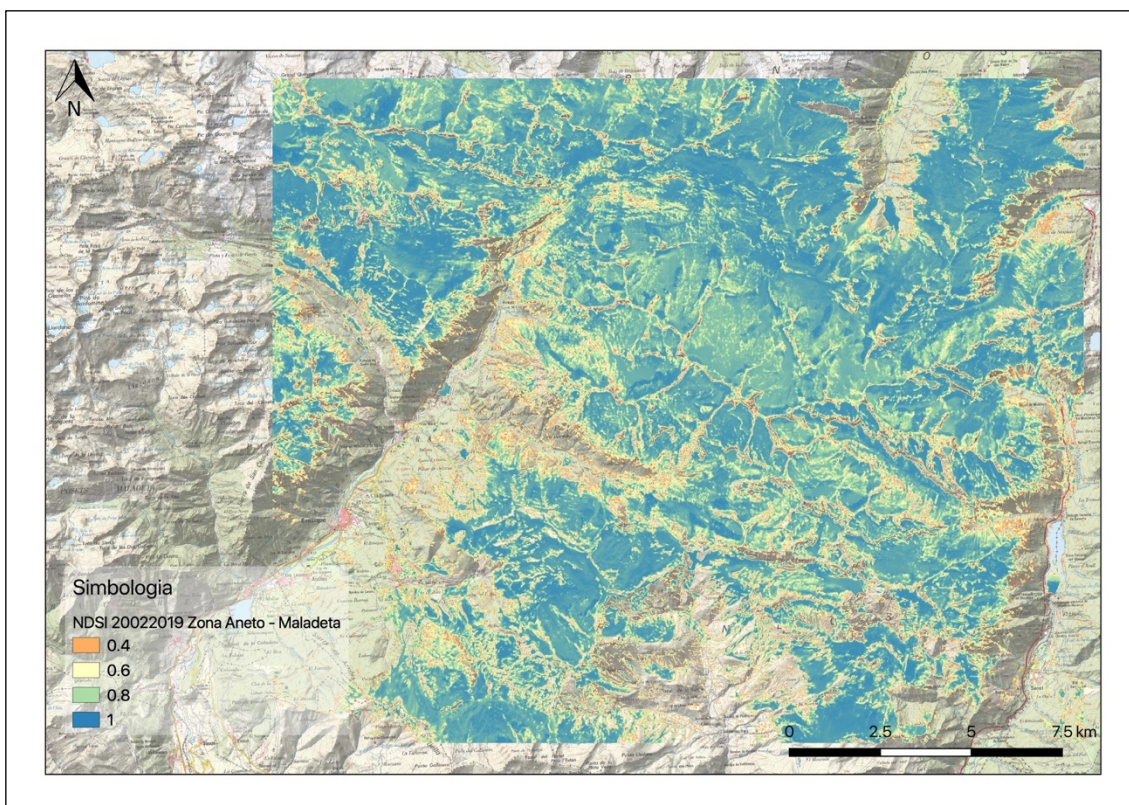


Figura 28. Representació de la zona l'Aneto – Maladeta del dia 20 de febrer de 2019.

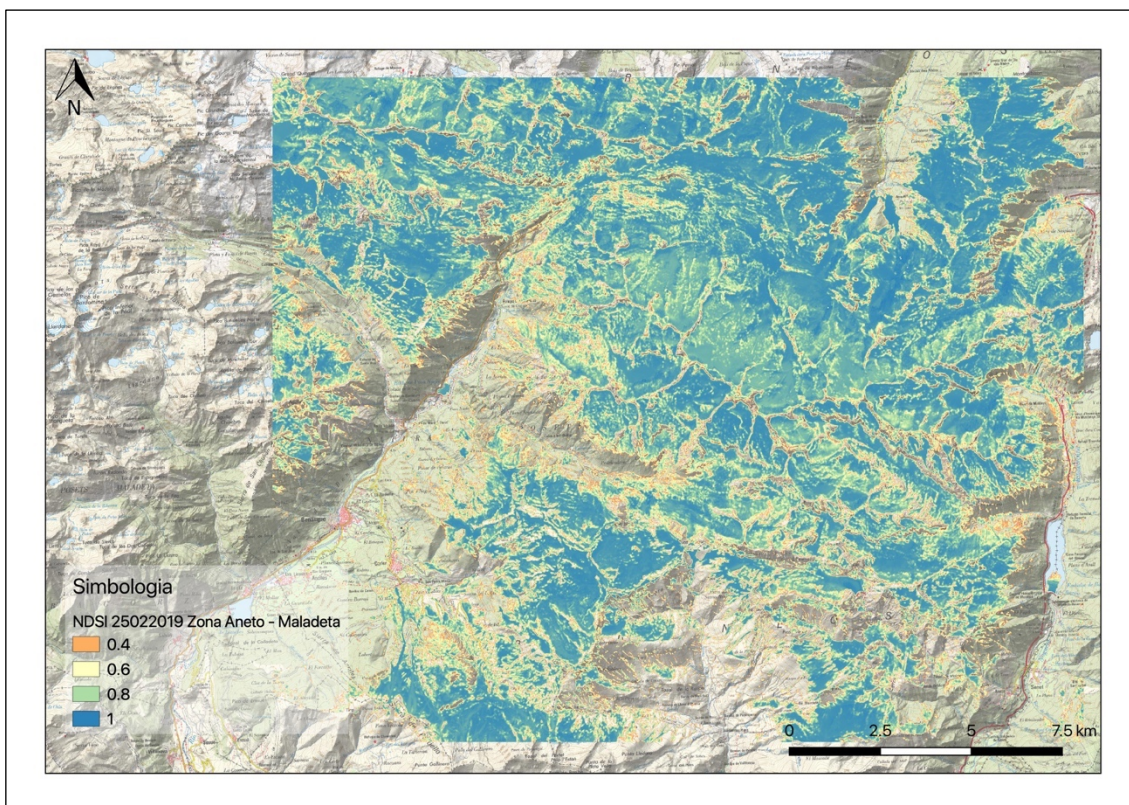


Figura 29. Representació de la zona l'Aneto - Maladeta del dia 25 de febrer de 2019.

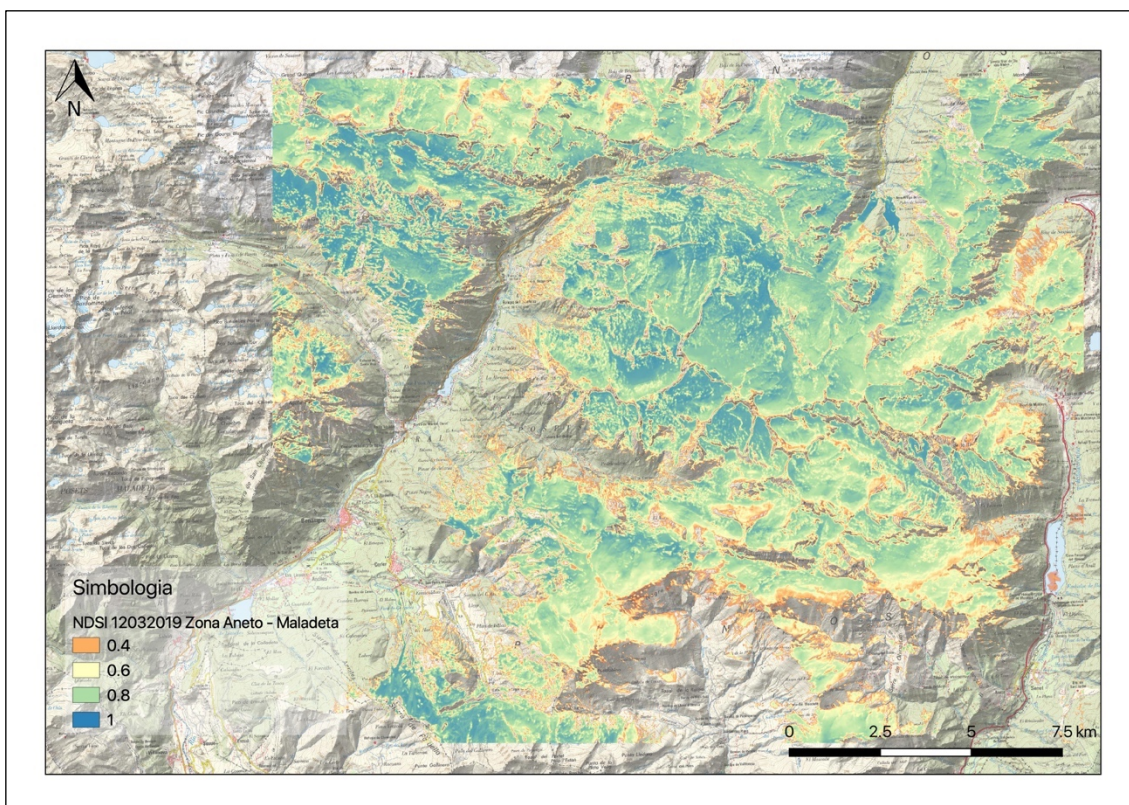


Figura 30. Representació de la zona l'Aneto - Maladeta del dia 12 de març de 2019.

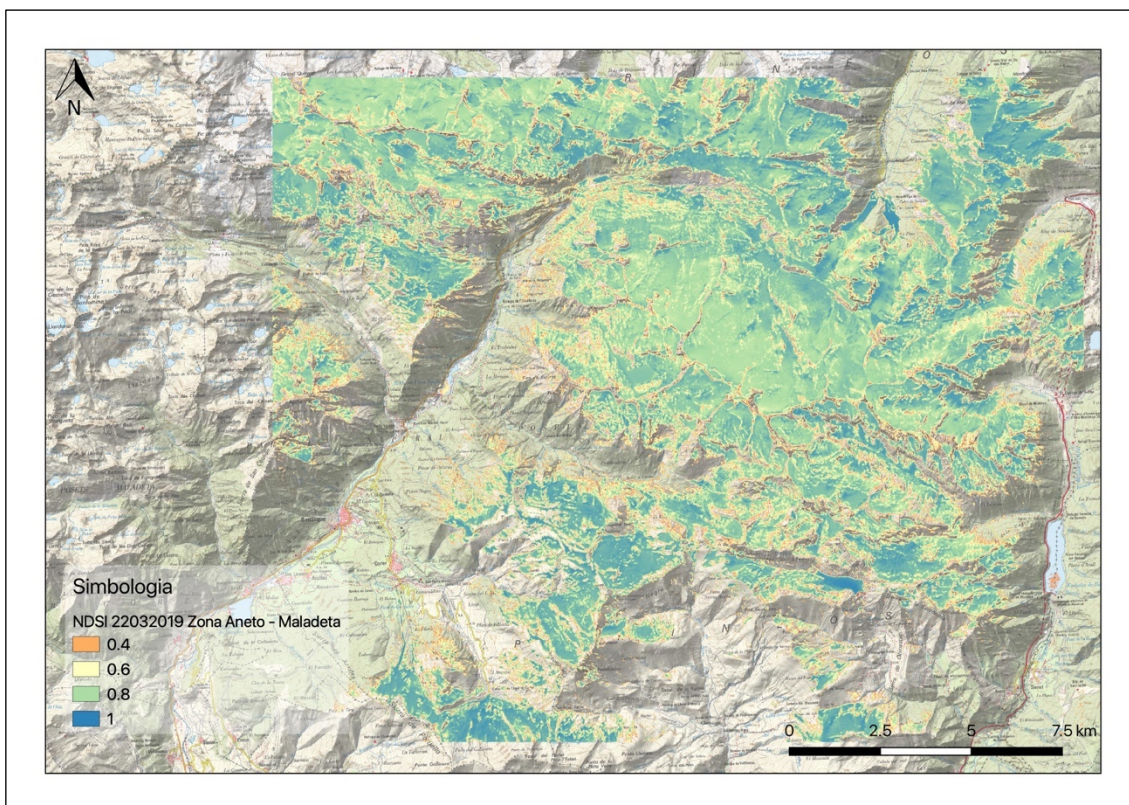


Figura 31. Representació de la zona l'Aneto – Maladeta del dia 22 de març de 2019.

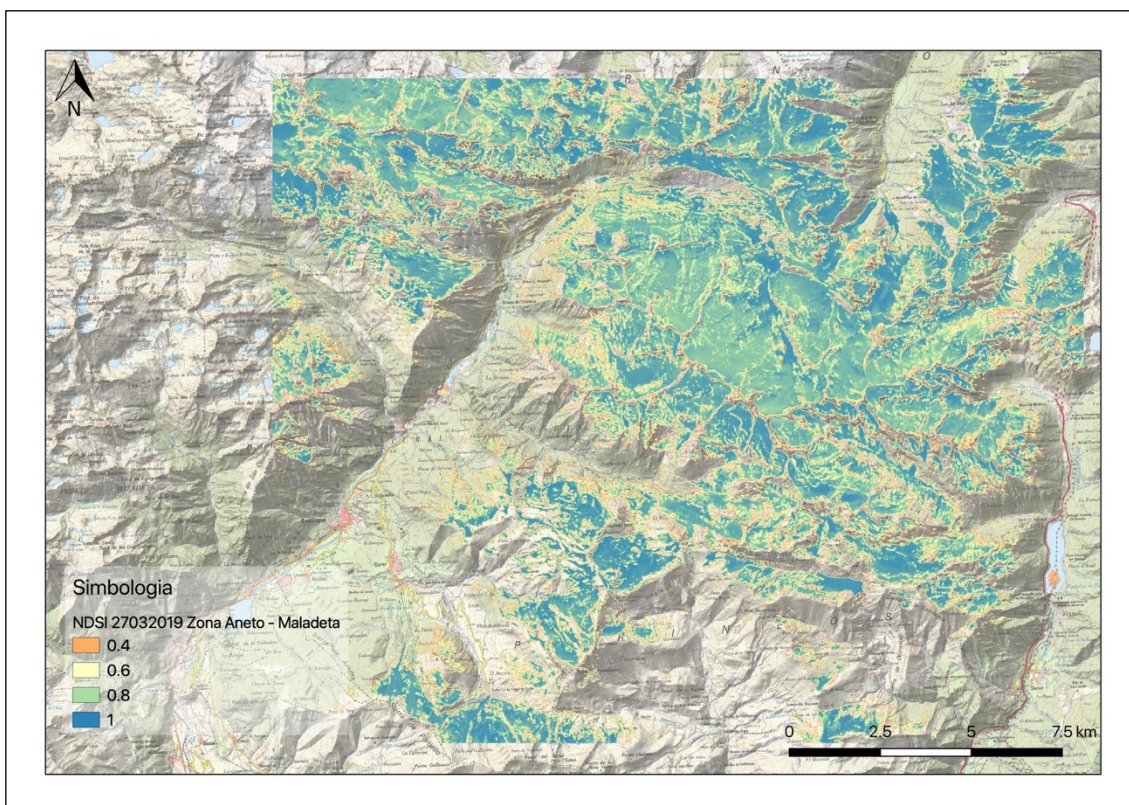


Figura 32. Representació de la zona l'Aneto – Maladeta del dia 27 de març de 2019.

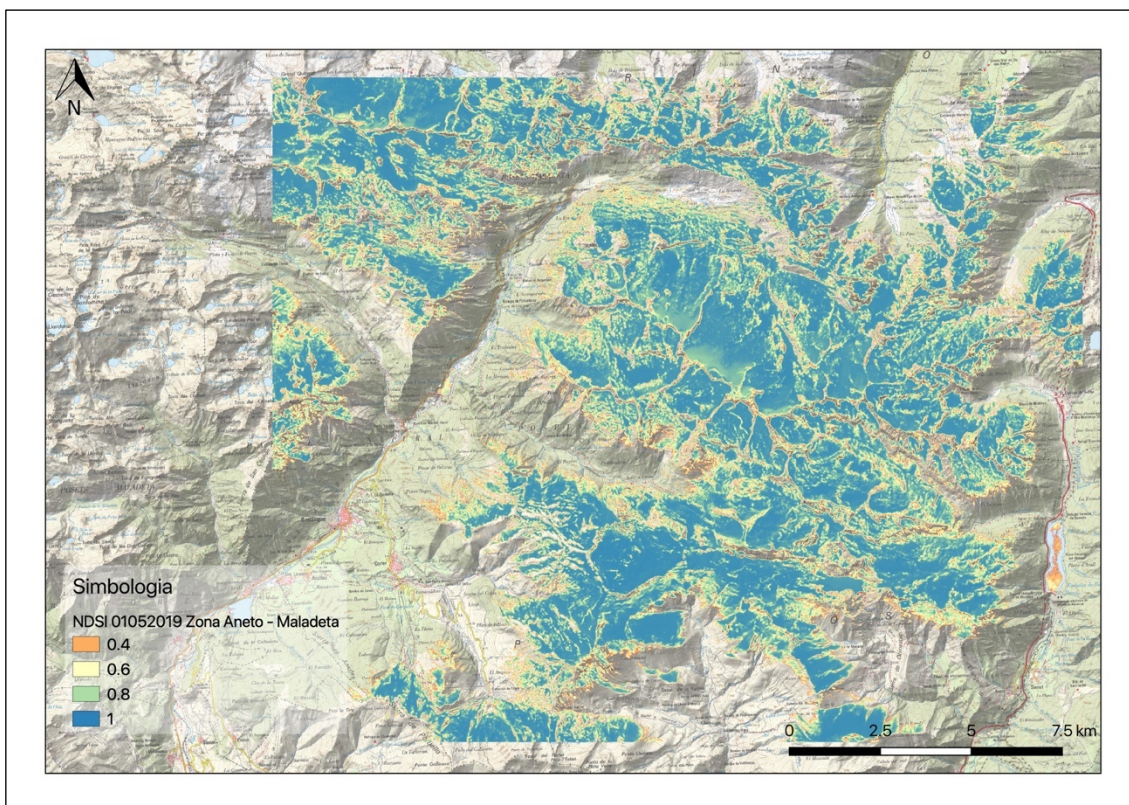


Figura 33. Representació de la zona l'Aneto – Maladeta del dia 1 de maig de 2019.

A partir d'aquesta data (Figura 33), la distribució del mantell nival comença a reduir-se de forma progressiva fins a arribar al mes d'agost.

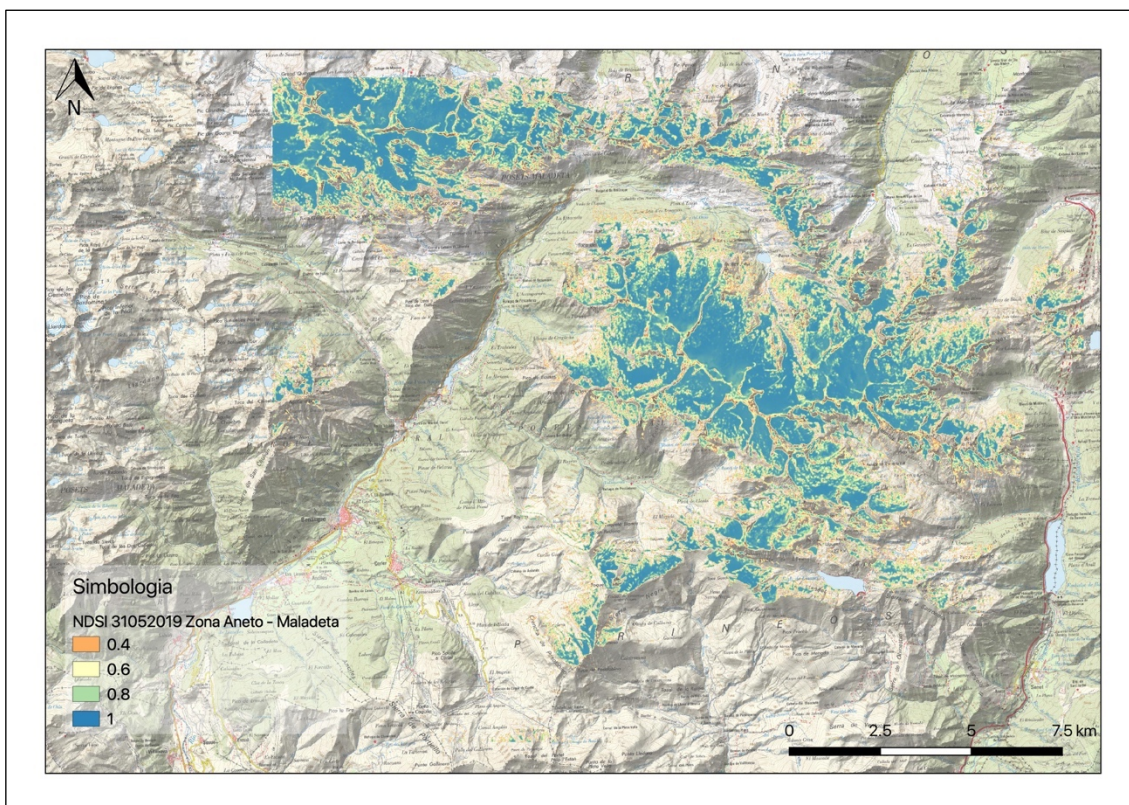


Figura 34. Representació de la zona l'Aneto – Maladeta del dia 31 de maig de 2019.

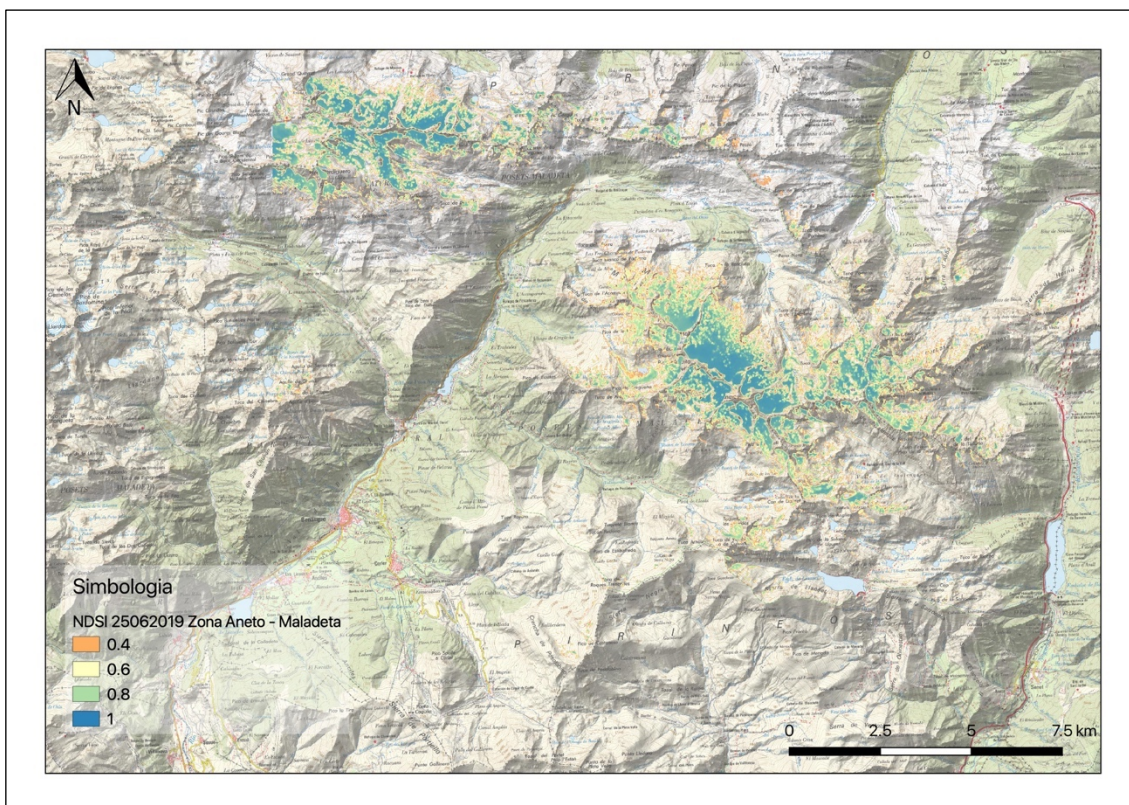


Figura 35. Representació de la zona l'Aneto – Maladeta del dia 26 de juny de 2019.

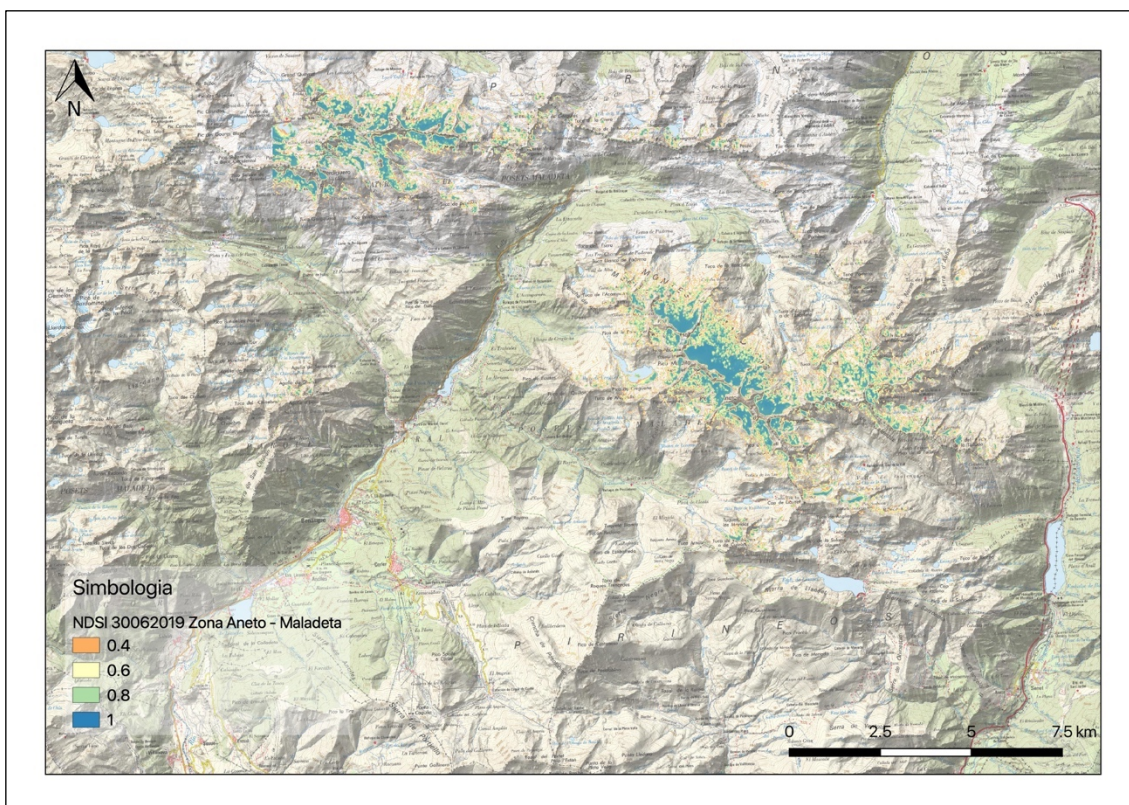


Figura 36. Representació de la zona l'Aneto – Maladeta del dia 30 de juny de 2019.

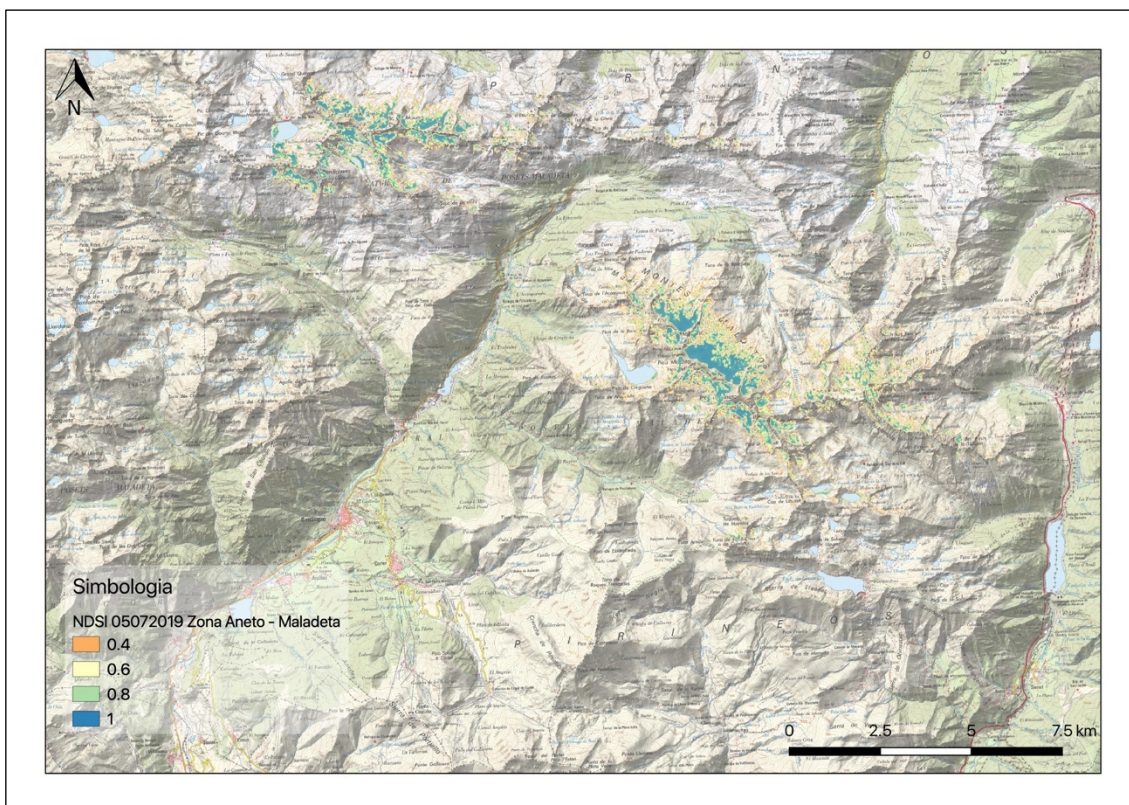


Figura 37. Representació de la zona l'Aneto – Maladeta del dia 5 de juliol de 2019.

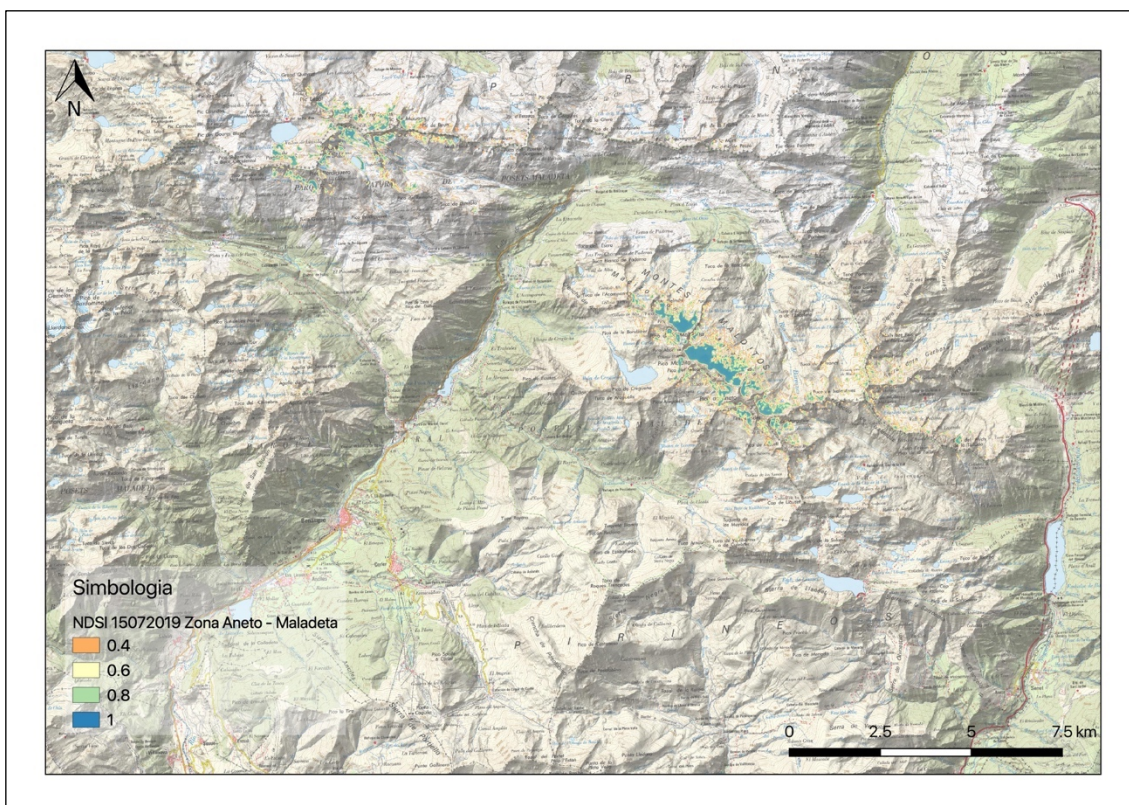


Figura 38. Representació de la zona l'Aneto – Maladeta del dia 15 de juliol de 2019.

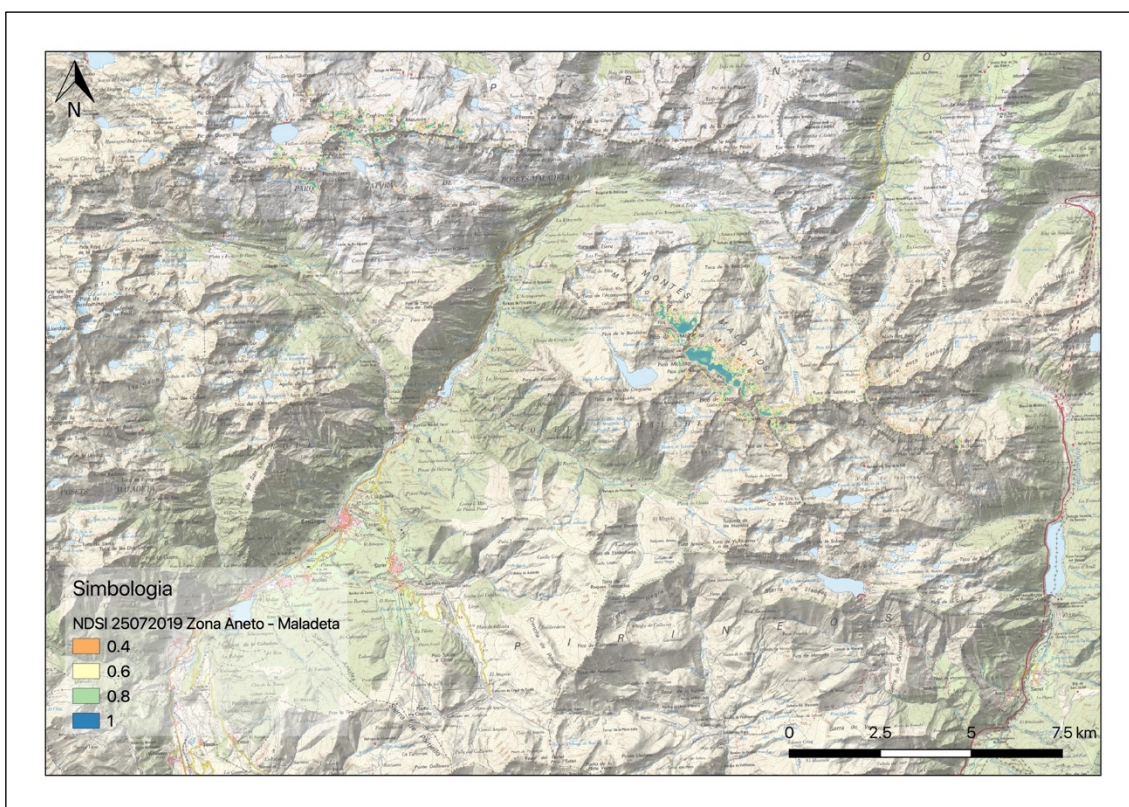


Figura 39. Representació de la zona l'Aneto – Maladeta del dia 25 de juliol de 2019.

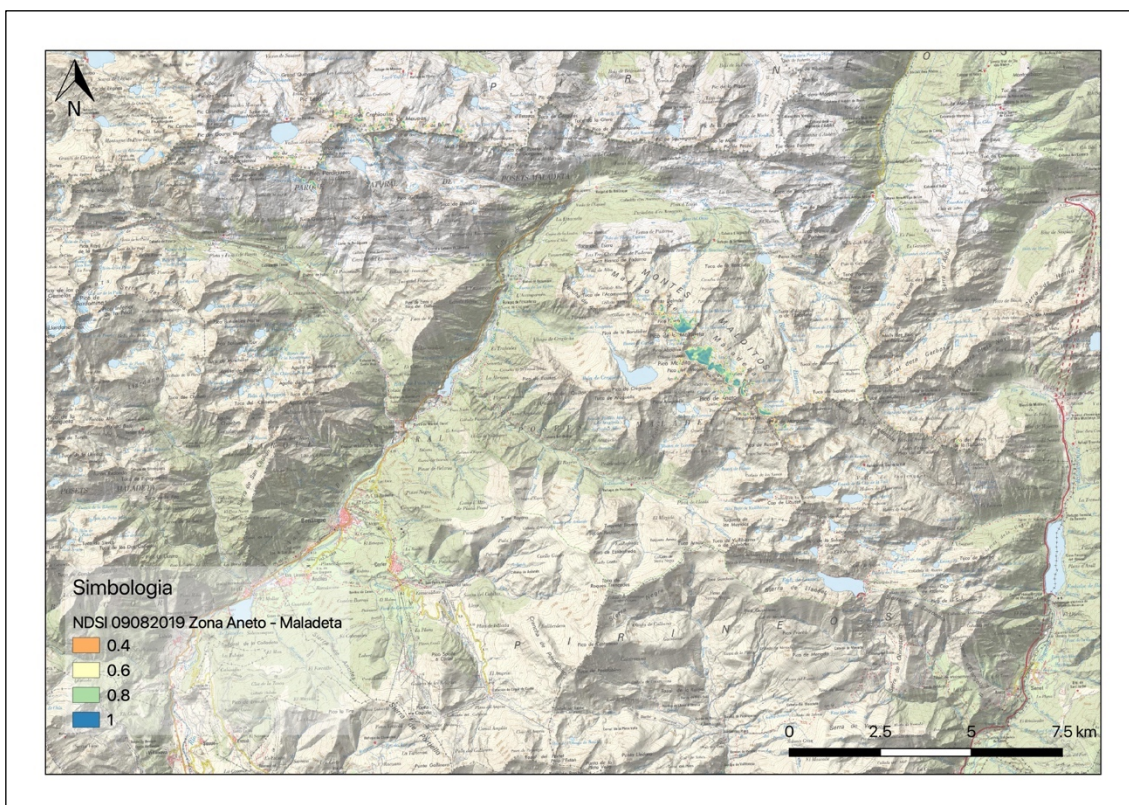


Figura 40. Representació de la zona l'Aneto – Maladeta del dia 9 d'agost de 2019.

Aquesta sèrie de figures recull l'evolució del mantell nival a la zona l'Aneto – Maladeta, però en tractar-se d'una visió tan àmplia, no s'aprecia el detall dels mapes. Per fer-ho, s'ha superposat un itinerari circular que ascendeix al Pic de Paderna en quatre dates diferents, amb l'objectiu de veure

com canvia la distribució del mantell nival en una superfície concreta. Un exemple n'és la següent fotografia (Figura 41) en la qual es pot veure part de l'itinerari durant el dia 13 de març i el 4 d'agost respectivament.



Figura 41. Fotografia de l'"Ibón" de la Renclusa en primer terme i el Pic de Paderna al fons, la primera captada el 13 de març i la segona el 4 d'agost.

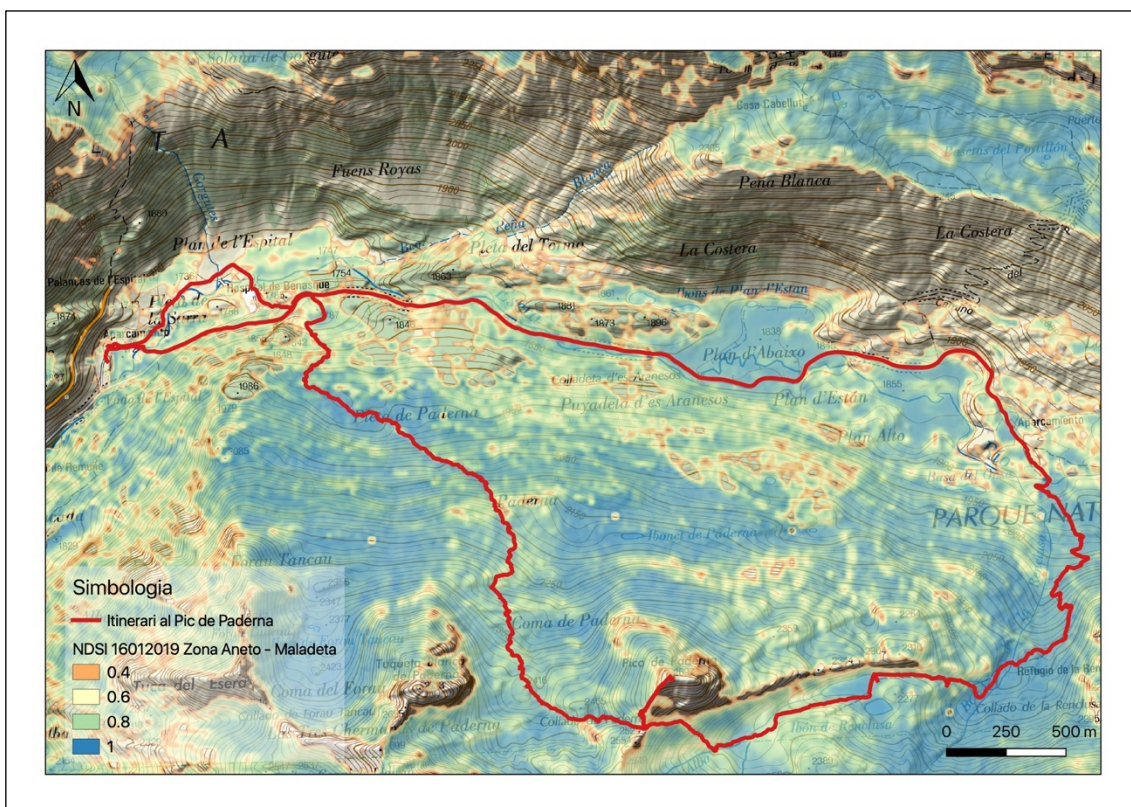


Figura 42. Recorregut del Pic de Paderna amb la distribució del mantell nival durant la jornada del 16 de gener de 2019.

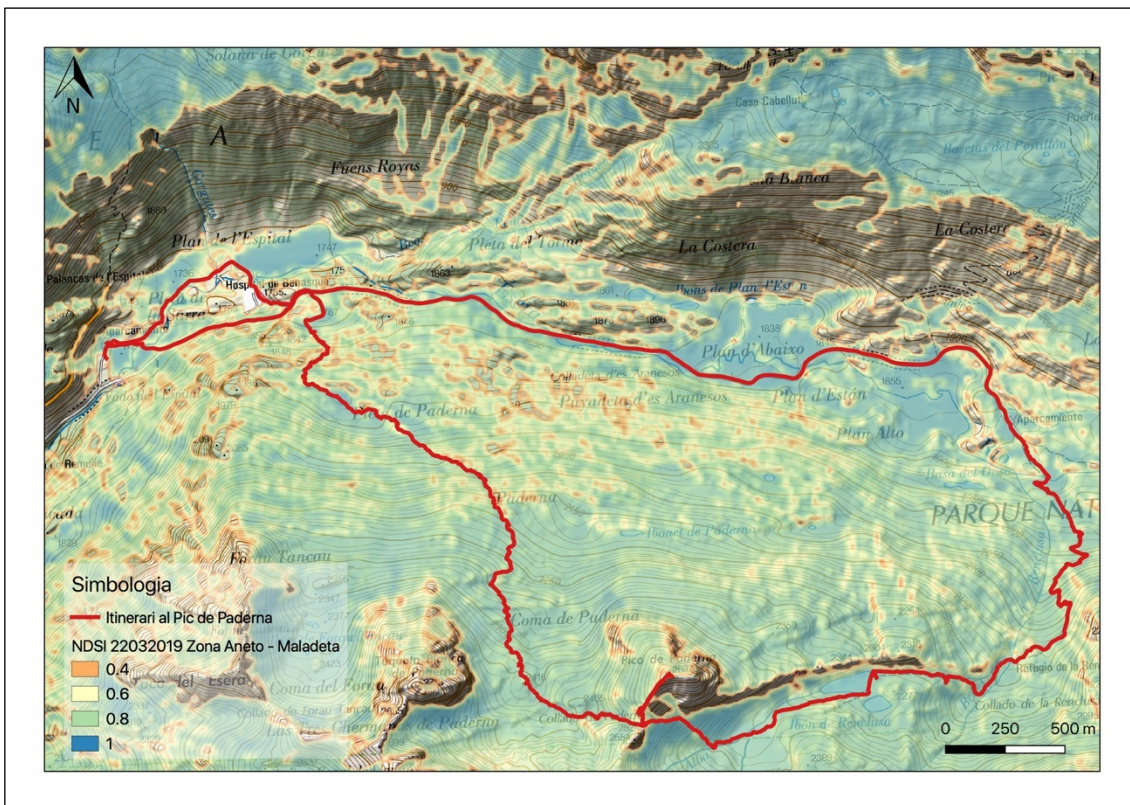


Figura 43. Recorregut del Pic de Paderna amb la distribució del mantell nival durant la jornada del 22 de març de 2019.



Figura 44. Recorregut del Pic de Paderna amb la distribució del mantell nival durant la jornada del 31 de maig de 2019.



Figura 45. Recorregut del Pic de Paderna amb la distribució del mantell nival durant la jornada del 9 d'agost de 2019.

A diferència de l'anterior sèrie d'imatges, aquí s'ha emprat una escala d'1:16.000, és a dir, s'obté un millor detall de cada zona i es compleix un dels objectius inicials, una cartografia dinàmica en el temps i en el detall.

5.3.1 Comprovació de la cartografia a través de les sortides realitzades

En la planificació de les sortides anteriorment esmentades en el punt 4.4, es buscava comprovar i entendre la cartografia generada en cadascuna de les zones. Amb el propòsit de poder explicar algunes d'aquestes sortides, s'han seleccionat sis moments concrets en dates diferents i es comentaran les diferents situacions observades.

"Ibones" de la Larri; Zona d'Ordesa i Monte Perdido – 6 de desembre de 2018

En aquest cas de la sortida del dia 6 de desembre del 2018, als "Ibones" de la Larri (Chisagüés), la disponibilitat de la imatge Sentinel-2 va ser posterior, concretament del dia 7 de desembre, però s'intentava realitzar l'activitat per poder disposar de la informació que després es contrastaria amb els mapes generats. En el cas d'aquesta sortida en concret, atès que el gruix de neu encara no era gaire important, d'uns 40 cm en una altitud de 2.500 metres en orientacions nord i nord-oest, es va poder comprovar com es comportava el model en zones on la pedregositat de les tarteres aflorava per culpa de la manca de neu, tal com es veu al vessant de la Figura 46, i quin és el resultat de la cartografia generada de la zona en concret a partir de l'índex. Unes situacions que a causa de la mida del píxel, són difícils d'ajustar i la pedregositat no resta representada en la cartografia.

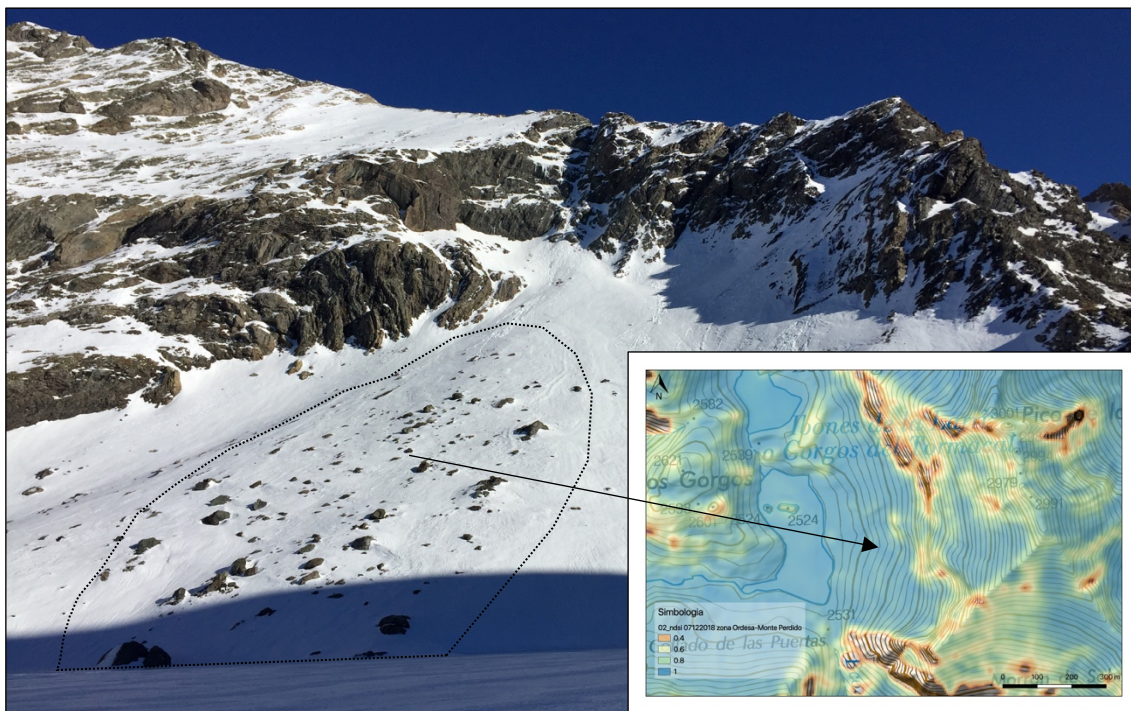


Figura 46. Fotografia realitzada el dia 6 de desembre de 2018 des de l'extrem oest de l'"Ibón" Inferior de la Larri en direcció a la vessant nord-oest del Pic de la Robiñera, en la qual es pot observar al marge esquerre la presència de roques en el pendent.

Amb l'entrada de l'hivern, i especialment durant els mesos de febrer, març i abril, els gruixos de neu s'incrementen en les vessants obagues, degut especialment al fet que la base de neu es va consolidant a causa de les baixes temperatures, el que fa que per exemple en la primera quinzena de febrer ja s'arribessin a gruixos de 80 a 100 cm en cotes elevades.

Punta Narronal; Zona del Valle de Tena – 16 de febrer de 2019

Així, en una altra sortida de camp realitzada a la zona del Valle de Tena, la distribució del mantell nival era molt més uniforme (Figura 47) en cotes superiors als 2.000 metres. Aquesta es va dur a terme el 16 de febrer de 2019, mentre que la cartografia obtinguda per aquell dia es va elaborar a partir d'una imatge de Sentinel-2 amb data del dia anterior (15 de febrer). En aquest cas, es va seleccionar el paratge de la Punta Narronal (Hoz de Jaca), un mirador cap a la Serra de Tendereña i els seus diferents pics i llacs que en formen part (Figura 48).



Figura 47. Fotografia realitzada el dia 16 de febrer de 2019 pujant des de la població d'Hoz de Jaca (Osca) amb una vista general del pic de Peña Telera per sobre del Valle de Tena.

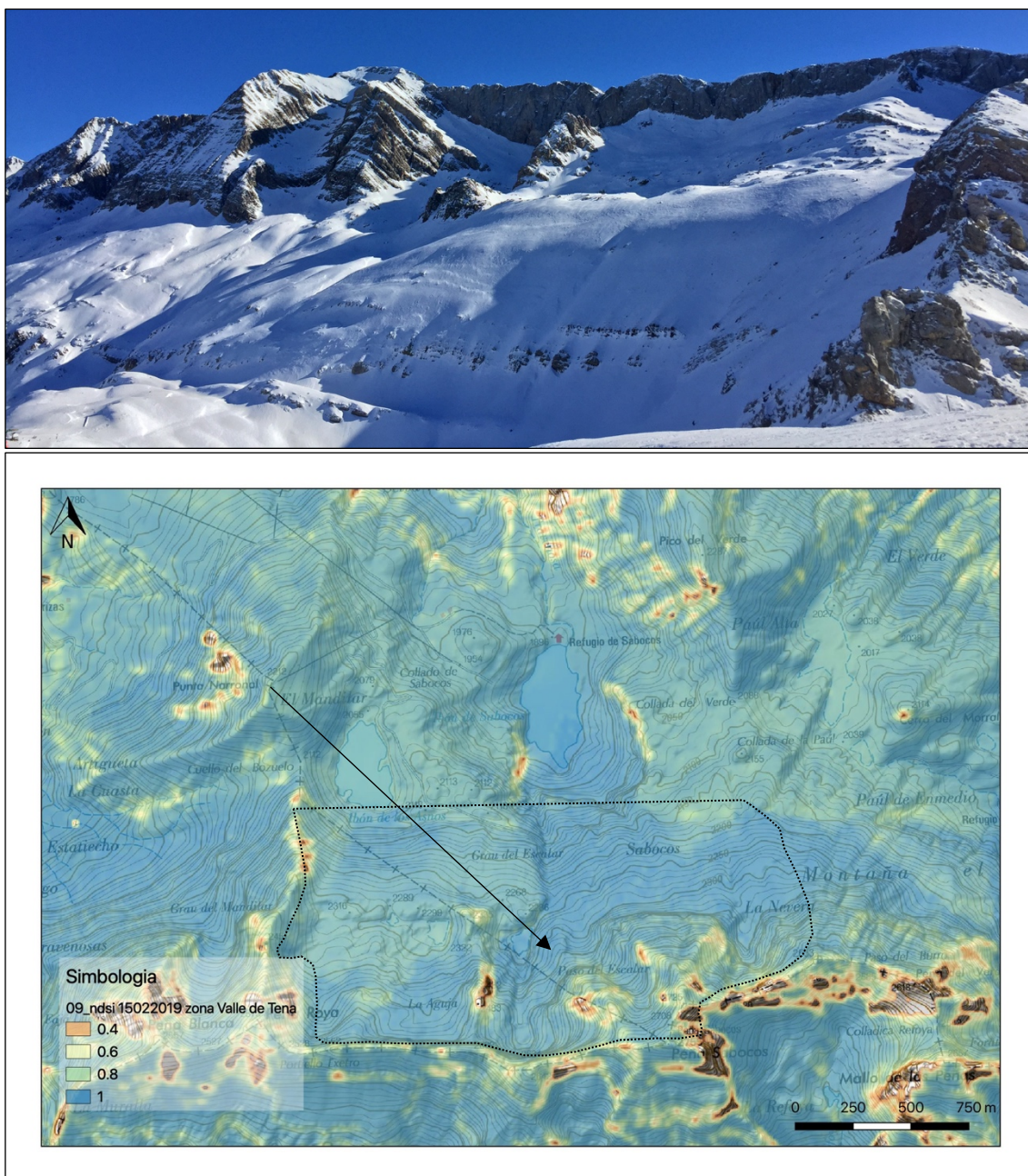


Figura 48. Fotografia realitzada el dia 16 de febrer de 2019 des de la Punta Narronal (Hoz de Jaca, Osca), amb les zones escarpades que caracteritzen la zona i el resultat de la cartografia realitzada amb la imatge del dia 15 de febrer de 2019.

En la cartografia generada es pot veure com les àrees amb la presència de parets escarpades de roca resulten difícils de ressaltar, en aquest cas, un increment del llinar a valors de 0,6-0,8 disminueix aquesta fa que les superfícies sense neu s'incrementin, especialment en aquestes zones més escarpades.

Pic de Sacroux; Zona d'Aneto i Maladeta – 10 març de 2019

Amb l'objectiu de seguir comprovant la informació generada en diferents situacions, el 10 de març de 2019 es va dur a terme una visita al paratge del Pic de Sacroux (Benasque), escollint una zona amb orientacions sud i sud-est en la majoria del seu recorregut i amb una situació de neu transformada a causa de les poques precipitacions a la zona durant el mes de febrer. A més, les

cotes de sortida eren relativament baixes, entorn de 1.700 metres, i les cotes superiors al voltant dels 2.600 metres, cosa que va permetre observar diferents situacions, amb un primer tram sense neu fins als 2.000 metres. A partir d'aquests, la neu presentava un mantell uniforme excepte en la zona més pròxima al Port de la Glera o Gorgutes (Figura 49), on aquesta desapareixia durant un tram aproximat de 100 metres longitudinals per després recuperar la uniformitat abans comentada.



Figura 49. Fotografia realitzada el dia 10 de març de 2019 des del Port de la Glera amb l' "lbón" de Gorgutes i la imatge a partir de la qual es pot observar el recorregut realitzat, amb el punt de sortida en la part inferior, i l'existència d'una gran variabilitat del mantell segons les zones vers l'altura i l'orientació.

Les Fites del Perdiguerset; Zona d'Aneto i Maladeta – 4 de maig de 2019

La sortida efectuada durant la jornada del 4 de maig de 2019 a la Vall de Lliterola es va realitzar amb la cartografia generada amb la imatge del dia 1 de maig, justament després d'un episodi de precipitacions generalitzades a la serralada. En aquest període de l'any, les diferències entre els vessants obagues i solejades s'accentua pel fet que el Sol té una major incidència en els pendents amb exposicions sud (Figura 50), pel contrari, les orientacions nord encara mantenen la neu.

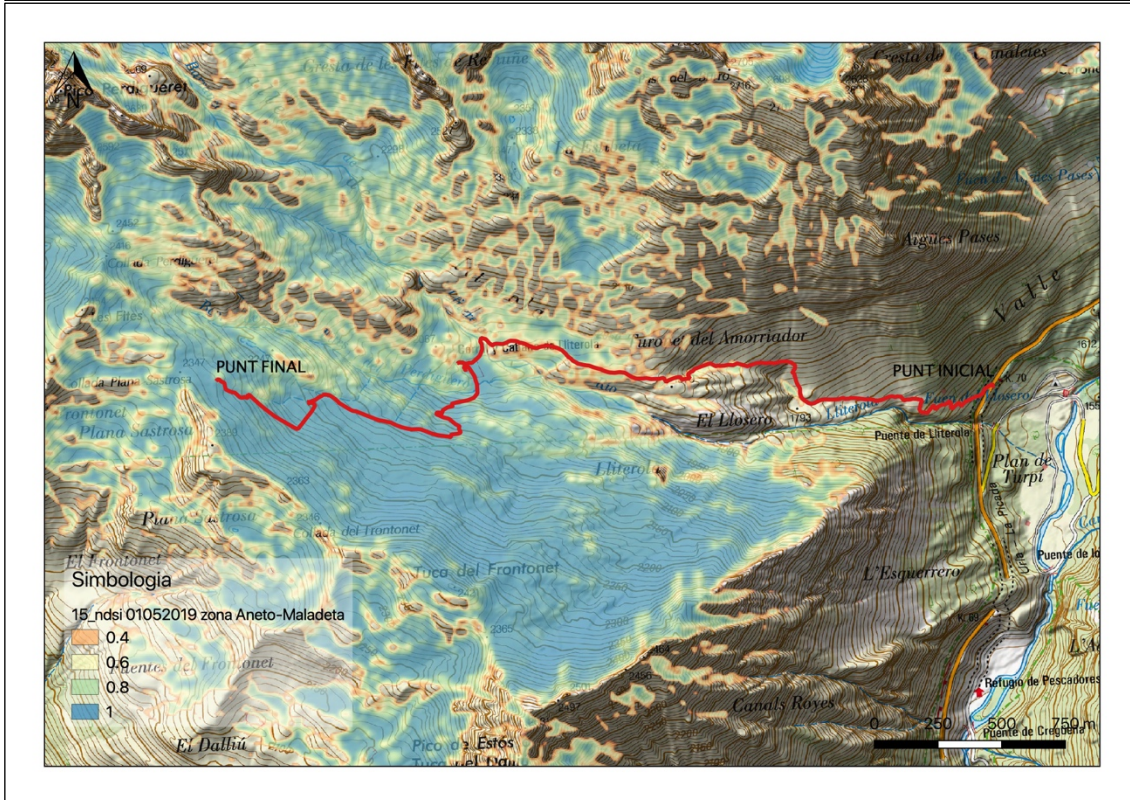


Figura 50. Fotografia pujant pel vessant nord de la Vall de Lliterola (Benasque) durant el dia 4 de maig de 2019 en la que es pot veure les diferències clarament marcades vers la continuïtat del mantell nival segons la seva orientació, i imatge de la cartografia generada a partir la informació del dia 1 de maig de 2019.

Peña Foratata; Zona del Valle de Tena – 16 de juny de 2019

Durant les darreres sortides es va buscar una informació diferent de les anteriors, ja que resulta evident que el mantell nival en la majoria de cotes resulta pràcticament inexistent, però encara així resten algunes zones on queden petites plaques en punts amb una acumulació de neu fruit de les característiques del terreny (barrancs per exemple). D'aquesta forma, la sortida del 16 de juny de 2019 al paratge de la Peña Foratata (Sallent de Gàllego) va permetre la comprovació del model en una situació diferent, buscant el detall de la cartografia generada a partir de la imatge del 25 de maig de 2019 en períodes amb poca neu (Figura 51), moments que poden resultar útils en segons quines situacions.

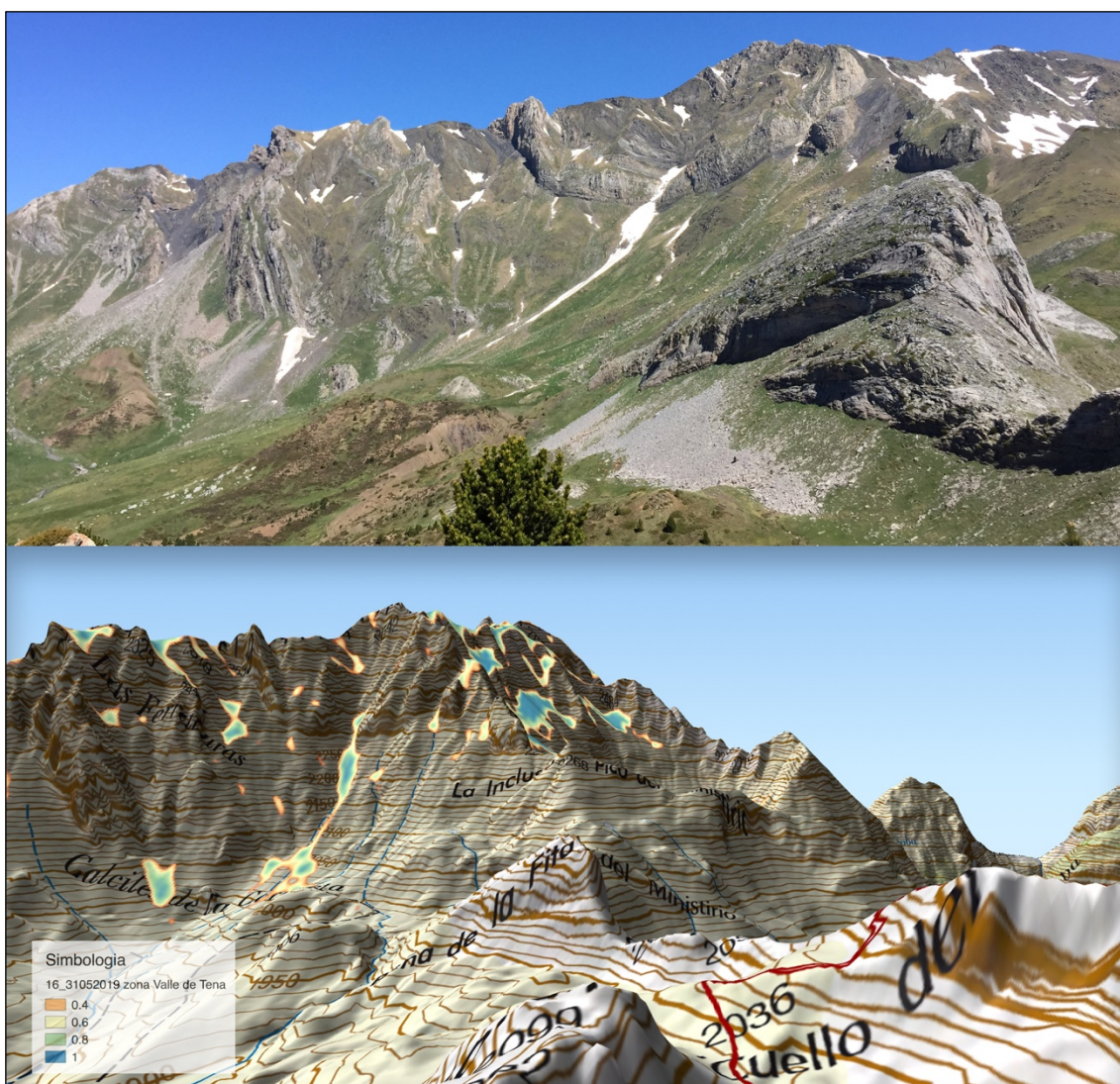


Figura 51. Fotografia des del Coll del Forato en direcció la zona de Las Ferraturas el dia 16 de juny, i representació a través d'un model en tres dimensions de la mateixa zona a través de la capa NDSI del dia 31 de maig de 2019.

A partir d'un determinat moment, el fet d'incrementar el llindar del valor de l'NDSI a xifres de 0,6-0,8 té un efecte negatiu sobre el resultat, i aquestes petites zones amb la presència de neu no queden reflectides.

Pic de Paderna; Zona d'Aneto i Maladeta – 4 d'agost de 2019

El Pic de Paderna s'aixeca davant la Maladeta, i permet observar tot el seu vessant nord i la seva glacera. A l'hivern aquesta es troba coberta de neu, però a mesura que l'estiu avança, el gel que estava cobert per aquesta neu surt a la superfície. En aquesta sortida es va poder veure i comprovar com per aquestes dates, el gel ja es podia visualitzar, alhora que a través de la cartografia generada, es podria interpretar que aquestes zones de gel es representen amb un valor inferior en comparació amb la neu tal com s'observa a la Figura 52. Això permet identificar a partir de quina data la neu superficial es desfà i aflora el gel, una situació a tenir en compte pels excursionistes que visitin la zona.

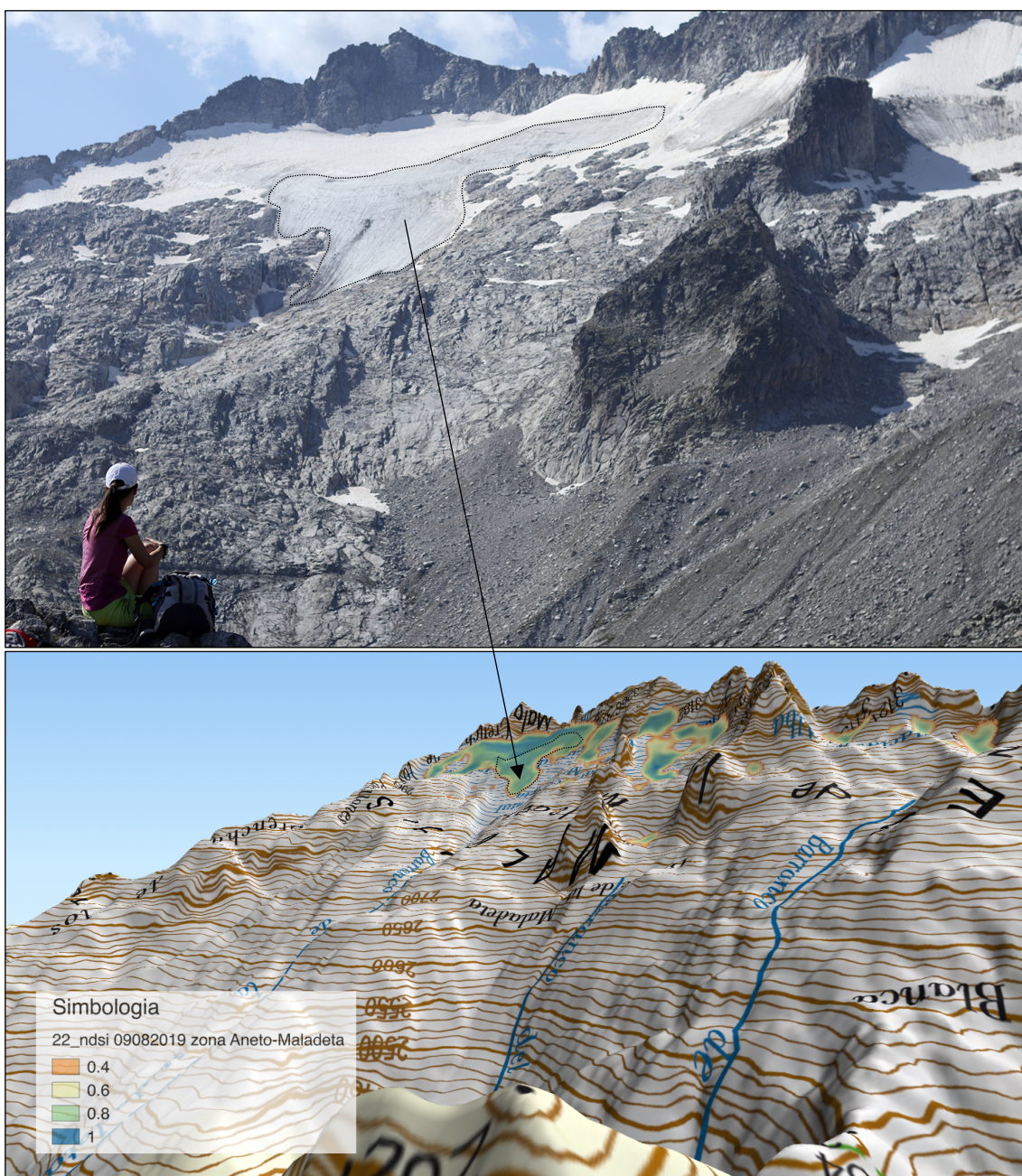


Figura 52. Fotografia des del Pic de Paderna en direcció a la Maladeta el dia 4 d'agost, i representació a través d'un model en tres dimensions de la mateixa zona a través de la capa NDSI del dia 9 d'agost de 2019 i com es pot veure els valors més baixos a la zona on és present el gel.

A partir d'aquestes sortides de camp, s'han avaluat diferents situacions al llarg del període d'estudi en les diferents zones, amb el propòsit d'entendre i validar els resultats de la cartografia generada a partir de les imatges de Sentinel-2 i el càlcul de l'NDSI.

5.4 Pendants a partir del Model Digital del Terreny

Les allaus són un fenomen que es repeteix en serralades com el Pirineu, zones amb una determinada topografia, vegetació, exposició, etc., estan exposades a la formació d'aquestes. En l'actualitat es treballa en l'elaboració de cartografies temàtiques (Julián et al, 2000) que delimitin aquestes zones, però sempre dependrà de les condicions meteorològiques i de l'estat de la neu, unes condicions que varien en el temps com s'ha pogut observar en el present document.

L'elaboració d'aquesta cartografia és complexa i no només cal descriure el terreny i la seva morfologia, sinó que és imprescindible un treball de camp per poder observar aquells vessants on es produeixen allaus de forma recurrent.

Ara bé, hi ha una sèrie de criteris que permeten establir zones amb més o menys probabilitat en el desencadenament d'allaus com són el límit altitudinal, els pendants, la morfologia dels vessants i la vegetació com criteris directes, mentre que es podria considerar l'orientació com indirecte. El model digital del terreny permet treballar amb varis d'aquests criteris, com són l'altura i el pendent.

- El límit altitudinal senyala l'altura a partir de la qual la neu pot fer acte de presència i conservar-se durant els mesos d'hivern i inicis de primavera, un límit que ve marcat aproximadament per la isoterma de 0 graus centígrads, i que durant els mesos hivernals ha estat establert al voltant dels 1.600 metres (García et al., 1985).
- Les pendants més favorables perquè es produeixin allaus són les compreses entre els 28 i 45 graus. Per sota, resulta difícil que la component longitudinal del pes de la neu superi les forces de resistència, i per sobre, la quantitat de neu que es pot acumular no és suficient com per a generar allaus de suficient envergadura.

Aquest és el motiu pel qual s'incorporen aquests mapes de pendants en el treball, fet que l'objectiu principal és cartografiar la distribució del mantell nival. La inclusió d'una variable de seguretat com és la detecció de zones amb aquestes altituds i pendants aporta un punt més d'informació, però sempre serà l'usuari expert qui prendrà les decisions finals. El punt 4.5.2 d'aquest document explica el procediment per obtenir els mapes de pendants en cadascuna de les zones, i com que l'anterior punt s'ha treballat sobre la zona Aneto – Maladeta, seguint amb aquesta metodologia es presenta en aquesta zona (Figura 53) com exemple, però les altres resten recollides de forma digital en la plataforma.

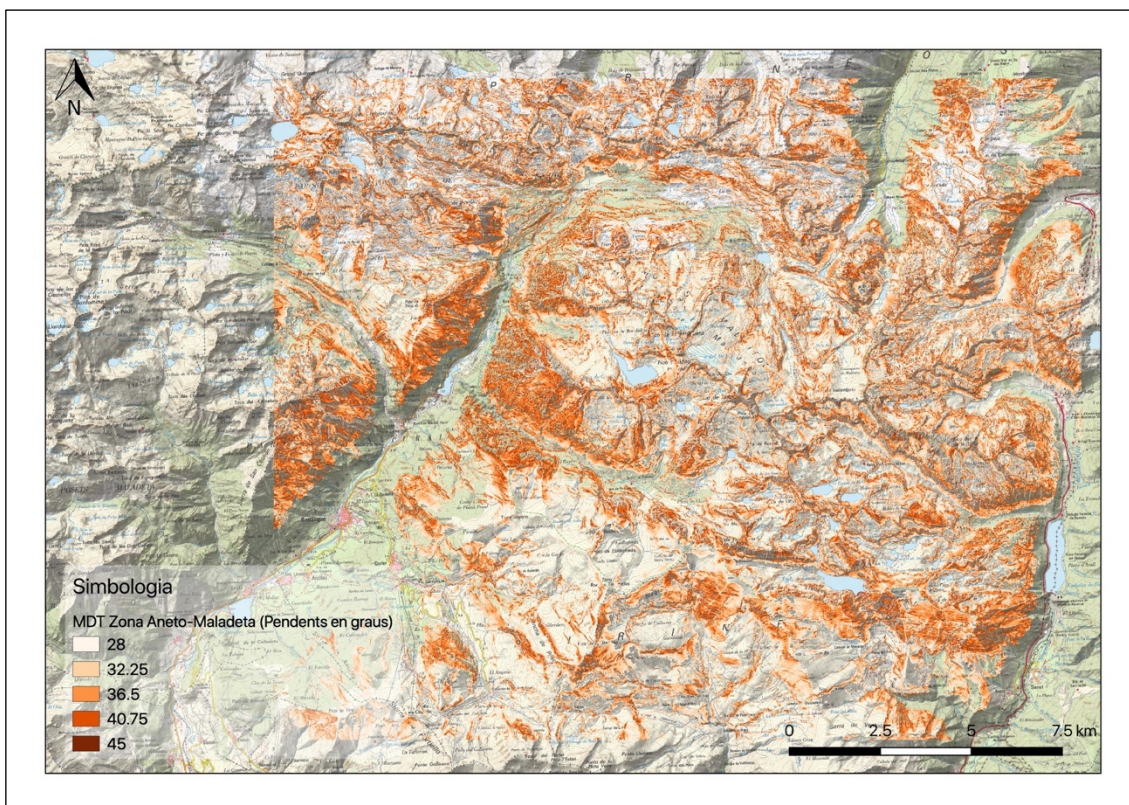


Figura 53. Mapa de pendents compreses entre els 28 i 45 graus a partir de 1.600 metres a la zona Aneto – Maladeta.

El mapa anterior es presenta en una escala 1:105.000, però en tractar-se d'una cartografia interactiva, aquesta es pot reduir i buscar el detall en itineraris com el del Pic de Paderna (Figura 54).

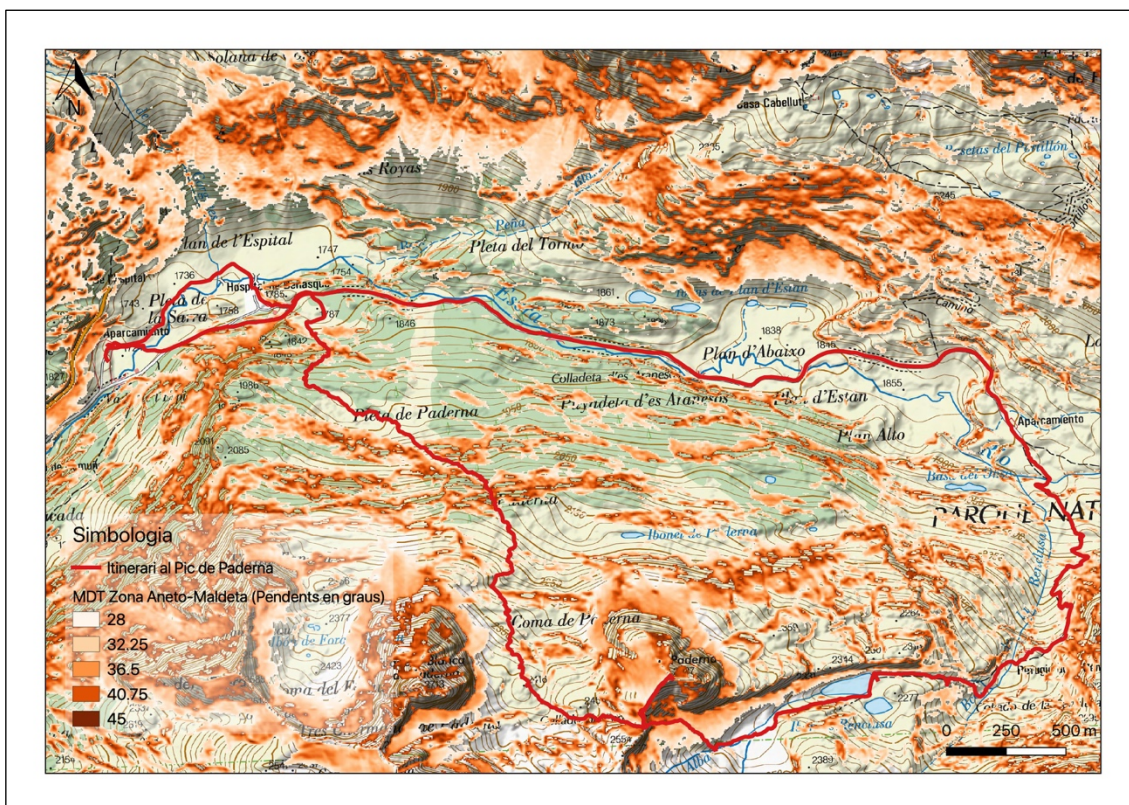


Figura 54. Mapa de pendents compreses entre els 28 i 45 graus a partir de 1.600 metres presents en l'itinerari al Pic de Paderna.

Però si amb aquest tipus de plànols s'afegeix la capa de l'índex NDSI d'una data concreta com per exemple el 22 de març de 2019, i es redueix l'escala a 1:5.000, es pot observar com poc abans d'arribar al cim, l'itinerari transita per una zona amb el rang de pendents proposat i la presència de neu en un vessant sud (Figura 55), una situació complexa i que a tall d'anècdota durant el març de 1991 ja va causar un accident amb nou militars de la Companyia d'Escaladors i Esquiadors del Regiment Valladolid 65, procedents de Barbastro. Són situacions puntuals que aquest tipus d'informació no podrà evitar, però sí ajudar en la planificació i presa de decisions.

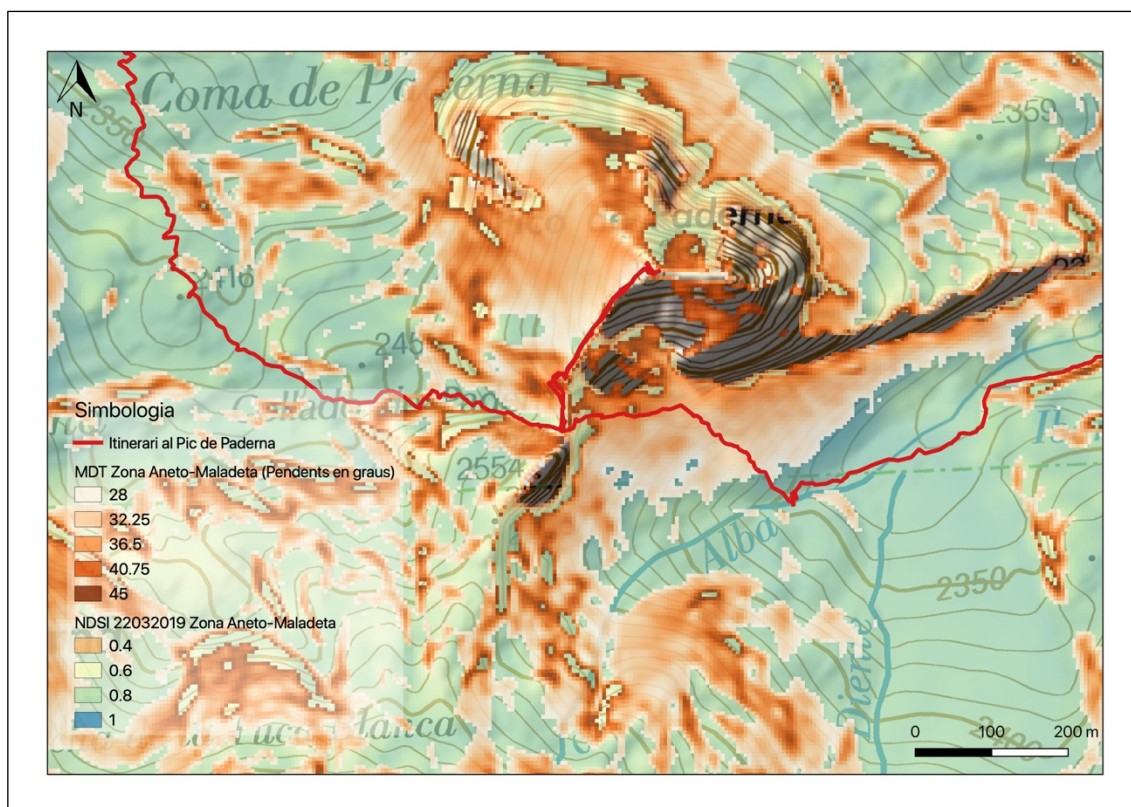


Figura 55. Mapa de pendents compreses entre els 28 i 45 graus a partir de 1.600 metres superposat a la capa de neu en els darrers metres de l'itinerari abans d'arribar al cim, on es pot apreciar una situació complexa.

6. Conclusions

Les imatges Sentinel-2, amb la seva resolució i freqüència de pas per les zones d'estudi, a través del seu processament resulten una bona font d'informació per poder determinar la distribució del mantell nival, però cal puntualitzar que les imatges amb presència de núvols són un problema, i més en una zona com el Pirineu. Ara bé, gràcies a l'elevada disponibilitat temporal d'imatges a diferència d'altres satèl·lits, aquest problema es minimitza, però és important fer una bona selecció de les imatges en el seu origen i aprofitar la distribució de les zones d'estudi. És a dir, la divisió en àrees més petites permet triar o descartar imatges en funció de la presència de nuvolositat.

L'ús de l'índex NDSI per diferenciar aquelles superfícies on és present neu o gel genera uns resultats que s'ajusten molt bé a la realitat, però en les primeres neus de la temporada, l'índex pot donar lloc a confusions, degut sobretot a la manca d'espessor de neu que no cobreix les roques. En conseqüència, aquelles zones amb la presència de roques fan disminuir lleugerament el valor

final de l'NDSI, però resulta molt difícil concretar la presència o no en aquestes situacions. És un problema que sorgeix a causa de la mida del píxel, amb una mida més reduïda es podria solucionar, però en aquest moment és una qüestió que dependrà de la interpretació de l'usuari final. Amb tot, aquests tipus d'inconvenients són presents en altres àmbits com l'agricultura per exemple, on la interpretació de la informació és tant o més important que aquesta.

El llindar per sobre de 0,4 que estableixen autors anteriors per classificar neu o gel està validat; no obstant, en zones amb una distribució de neu molt irregular, incrementar aquest valor pot discriminar àrees puntuals, especialment en superfícies rocalloses. Alhora, i aprofitant aquest punt, és evident que el valor de la neu se situa entre 0,4 i 1, però caldria treballar i intentar relacionar aquests valors amb la tipologia de la neu després d'episodis de precipitacions registrades per les estacions meteorològiques. Per exemple, en les darreres imatges disponibles, les glaceres mostren una disminució d'aquest valor quan la neu es desfà i el gel surt a la superfície, una informació que es podria completar amb altres eines com per exemple l'ús del radar, fet que permetria conèixer els canvis en l'espessor de la neu amb resolucions de mil·límetres.

La cartografia del mantell nival i la seva evolució en el temps aporten una informació que fins ara estava disponible a través de butlletins generals, webcams en ubicacions concretes o a través de les xarxes socials amb comentaris que podien aportar els usuaris. Aquests mapes expliquen la situació en qualsevol punt de la zona d'estudi, i són totalment complementaris a la resta de fonts, ajudant a la planificació dels itineraris i les activitats. Tanmateix però, és important ressaltar que la representació d'aquesta cartografia és un punt feble, un aspecte a treballar i millorar en noves actualitzacions.

L'àrea analitzada s'identifica clarament amb la part central del Pirineu, però és una tècnica totalment replicable en altres parts de la serralada, així com en formacions de la península com la Serralada Cantàbrica, el Sistema Central i Ibèric, i regons de les Serralades Bètiques. A més a més, altres regions d'Europa com els Alps, també podrien beneficiar-se d'aquest tipus d'informació.

El present treball recull aspectes de diferents àmbits, sense entrar en profunditat en cap d'aquests, ja que són temes com la teledetecció, el SIG o l'estudi d'un fenomen com la neu que necessiten un gran coneixement. Però les molt bàsiques nocions d'aquests en combinació amb les experiències trobades en cadascuna de les sortides i disposar d'un equip de persones a qui transmetre aquesta informació recollida, fan que aquest projecte no tingui el seu final aquí, sinó que pugui seguir evolucionant en una eina útil per un sector diferent dels que teníem plantejats fins ara. Així, les línies de treball futures se centren a treballar sobre el fet de fer accessible aquesta informació a usuaris que visitin aquestes zones i practiquin activitats de lleure, però també presentar-la a plataformes ja consolidades perquè la puguin integrar. Sense deixar de banda els mateixos organismes que s'encarreguen de Parcs Nacionals i Naturals, que són els primers interessats a proporcionar una informació útil als visitants, o fins i tot, i sent ambicions, aprofitar l'esforç que fan

països com Andorra per promocionar el turisme de neu, perquè puguin fer el seguiment de tota la superfície del país. Abans però, serà clau la presentació d'aquesta informació, que sigui senzilla i entenedora.

7. Referències bibliogràfiques

Berástegui, X., Losantos, M., Muñoz, J. A. i Puigdefàbregas, C., 1993. Tall geològic del Pirineu central 1:200.000. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Departament de Política Territorial i Obres Públiques. 62.

Buyse, J., 1993. Los tresmiles del Pirineo, un estudio enciclopédico (3ª edición revisada y ampliada).

Capellà, I. i Carreras, J., 1996. La zonación estructural del Hercínico del Pirineo central en el anticlinorio de la Pallaresa. Estudios Geológicos, 52, 51-61.

Cea López, C., Cristóbal Rosselló, J., Pons Fernández, X., 2007. Determinación de la superficie nival del Pirineo Catalán mediante imágenes Landsat y Modis, a: XII Congreso Nacional de Tecnologías de La Información Geográfica. Granada, Setembre 19–22.

Chueca Cía, J., Julián Andrés, A., Saz Sánchez, M.A., Creu Novau, J., López-Moreno, J.I., 2005. Responses to climatic changes since the Little Ice Age on Maladeta Glacier (Central Pyrenees). Geomorphology 68, 167–182. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.11.012>

CNIG. Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica. URL <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp> (Data d'accés: 11/09/2019).

Copernicus Open Access Hub. URL <https://scihub.copernicus.eu> (Data d'accés: 11/09/2019).

Dario, R., 31/12/2018. Ordesa despide el año con récord de visitas a la espera de las primeras obras del centenario. Heraldo. <https://www.heraldo.es/noticias/aragon/huesca/2018/12/30/ordesa-despide-ano-con-record-visitas-espera-las-primeras-obras-del-centenario-1285119-2261127.html>

Dozier, J., 1989. Spectral signature of alpine snow cover from the landsat thematic mapper. Remote Sens. Environ. 28, 9–22. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90101-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90101-6).

Earth Observing System – Land Viewer. URL <https://eos.com/landviewer/> (Data d'accés: 31/08/2019)

Garcia de Pedraza, L., 1982. Aspectos Argrometeorológicos del Pirineo. Instituto Nacional de Meteorología.

García Ruiz, J.M., Puigdefabregas, J., Martí Bono, C.E., 1985. Los recursos hídricos superficiales del Alto Aragón. Huesca.

- Hall, D.K., Riggs, G.G., Salomonson, V.V., DiGirolamo, N.E., Bayr, K.J., 2002. MODIS snow-cover products. *Remote Sens. Environ.*, 83 (1): 181–194.
- Hall, D.K., Riggs, G.A., 2011. Normalized-Difference Snow Index (NDSI). *Encycl. Snow, Ice Glaciers* *Encycl. Earth Sci. Ser.* https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_376.
- Instituto Geográfico Nacional, Ministerio de Fomento, 2018. Atlas Nacional de España.
- InfoGruixNEU. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. URL <http://www.icgc.cat/Administracio-i-empresa/Serveis/Alaus/Informacio-nivologica/InfoGruixNEU> (Data d'accés: 31/08/2019).
- Julián Andrés, A., Peña Monné, J.L., Chueca Cía, J., Zabalza Martínez, J., Lapeña Laiglesia, A., López Moreno, I., 2000. Cartografía de zonas probables de aludes en el Pirineo Aragonés: Metodología y resultados, *Boletín de la A.G.E.*
- Kaplan, G., Avdan, U., 2017. Algorithm for snow monitoring using remote sensing data. *Anadolu Univ. J. Sci. Technol. A- Appl. Sci. Eng.* 18, 238–246. <https://doi.org/10.18038/aubtda.273972>.
- Kulkarni, A. V., Srinivasulu, J., Manjul, S.S., Mathur, P., 2002. Field based spectral reflectance studies to develop NDSI method for snow cover monitoring. *J. Indian Soc. Remote Sens.* 30, 73–80. <https://doi.org/10.1007/BF02989978>.
- Land Viewer. EOS Data Analytics. URL <https://eos.com/landviewer/> (Data d'accés: 10/08/2019).
- Lasanta, T., 2010. El turismo de nieve como estrategia de desarrollo en el Pirineo Aragonés. *Cuad. Investig. Geogr.* 36, 145–163.
- Li, J., Roy, D.P., 2017. A global analysis of Sentinel-2a, Sentinel-2b and Landsat-8 data revisit intervals and implications for terrestrial monitoring. *Remote Sens.* 9. <https://doi.org/10.3390/rs9090902>.
- Memoria de anual de gestión 2017 del Parque Natural Posets – Maladeta, 2017. Gobierno de Aragón, Departamento de Desarrollo Rural y Sonstenibilidad.
- Ministerio para la Transición Ecológica, 2019. ERHIN- Evaluación de recursos hídricos procedentes de la innivación URL <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/evaluacion-de-los-recursos-hidricos/ERHIN/> (Data d'accés 13/07/2019).
- Muñoz, J.A., 1992. Evolution of a continental collision belt: ECORS-Pyrenees crustal balanced cross-section. A: McClay, K.R. (ed.) *Thrust tectonics*. Chapman and Hall ed., p. 235-246.
- Palomares Casado, M., 1982. La meteorología en el turismo de alta montaña. *Geographica* 13–16, 51–66.

- Pérez Cardiel, E., 2015. Análisis espacio-temporal del manto de nieve en el Pirineo occidental aragonés mediante imágenes Landsat. TAZ-TFG-2015-2267.
- Pineda, N., Jorge, J., Martí, G., Garcia, C., Tarruella, R., 2005. Dinámica del manto nivoso en el Pirineo: Seguimiento con Spot-Vegetation de los años 1998-2003, a: XI Congreso Nacional de Teledetección. pp. 429–436.
- Pons, M., López Moreno, J.I., Esteban, P., Macià, S., Gavalda, J., García, C., Rosas-Casals, M., Jover, E., 2014. Influencia del cambio climático en el turismo de nieve del Pirineo. Experiencia del proyecto de investigación NIVOPYR. Pirineos. Rev. Ecol. Montaña 169. <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2014.169006>.
- Riggs, G.A., Hall, D.K., Salomonson, V.V. 1994. A snow index for Landsat thematic mapper and moderate resolution imaging spectroradiometer. Proceedings of IGARSS '94 - 1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Pasadena, CA, USA, 1994, pp. 1942-1944 vol.4.
- Riihelä, A., Lahtinen, P., Hakala, T., 2011. The Radiation, Snow Characteristics and Albedo at Summit (RASCALS) expedition report.
- Revuelto, J., Arguedas, G., Serreta, A., 2013. Terrestre En La Monitorización De Procesos Geomorfológicos Dinámicos: El Manto De Nieve. Cuad. Investig. Geográfica 39, 335–357.
- Salomonson, V.V., Appel, I., 2004. Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index. Remote Sens. Environ. 89, 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.10.016>.
- Teixell, A., 1996. The Ansó transect of the Southern Pyrenees: basement and cover thrust geometries. Journal of the Geological Society, 153, 301-310.